

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

Modelado de incertidumbre en  
sistema de comunicaciones y  
actuadores de un aerogenerador y  
diseño de algoritmos de control  
inmunes a sus efectos



Máster Universitario en  
Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Máster

Jaione Berro Bariain

Directores: Jorge Elso Torralba  
Jesús Arellano Aguado

Pamplona, 18 de septiembre de 2018



## AGRADECIMIENTOS

A todo el departamento de Control de Siemens Gamesa R.E. por haberlo hecho todo mucho más ameno y sencillo.

A Jesús, por sus oportunas indicaciones y asesoramiento durante todo el trabajo.

A Mikel por enseñarme poco a poco a utilizar Matlab desde cero y a comprender mejor los resultados. También por hacer que las horas no se hagan tan pesadas.

A Aitor por nuestro tiempo de ocio y ayudarme en todo lo que ha podido tanto personal como profesionalmente.

A Asier, por soportarme, por su paciencia y por su gran motivación por hacer que la gente aprenda y disfrute de lo que hace. Muchas gracias por todo, eres el mejor.

A mi familia por el apoyo que siempre me muestra y ha mostrado a lo largo de todo este proyecto.



## RESUMEN

Este **Trabajo Fin de Máster (TFM)** se ha llevado a cabo en la empresa **Siemens Gamesa R.E.** ubicada en Pamplona (Navarra), la cual se dedica al sector eólico. Se enmarca dentro de la colaboración existente entre el Grupo de Sistemas Dinámicos y de Control de la **Universidad Pública de Navarra (UPNA)** con Siemens Gamesa desde 2014. En concreto se realiza en el departamento de Tecnología, dentro del **área de control**.

Este trabajo surge debido a una problemática real existente en el entorno industrial una vez que los aerogeneradores son instalados y puestos en funcionamiento. Debido a diferentes **retrasos** en los sistemas de **comunicación y a la dinámica de los actuadores**, se generan diversas cargas a fatiga en el sistema que pueden llegar a afectar de manera crítica al funcionamiento de la máquina y a reducir notablemente el tiempo de vida útil de varios de sus componentes.

Ante esta problemática, este proyecto propone diferentes alternativas para reducir los efectos de los retrasos a través de la **mejora de la estrategia de control** de la máquina. En concreto, en este trabajo se proponen varias modificaciones dentro de una estrategia tradicional de control de un aerogenerador para conseguir que dicho control sea inmune a los efectos de los retrasos que se producen en las comunicaciones del aerogenerador y funcionamiento de actuadores en el lazo de control de pitch, o paso de pala.

Para llevar a cabo el diseño de estas estrategias de control, se ha trabajado con un modelo de máquina denominado **UPWIND**. Este modelo tiene una potencia de **5MW**, cuyas palas están ubicadas a **barlovento** (delante de la torre). Es una máquina de velocidad variable y está ubicada tierra adentro (onshore). El modelo UPWIND se ha desarrollado utilizando el código aerolástico **FAST**, un software gratuito proporcionado por NREL (National Renewable Energy Laboratory).

La estrategia de control que se va a emplear como referencia en este proyecto es la desarrollada por Asier Díaz de Corcuera en [3]. Las diferentes propuestas de control desarrolladas en este TFM se incluyen dentro del código fuente elaborado en dicha tesis doctoral mediante la programación de las mismas en **lenguaje C** y la generación de su correspondiente librería dll. El diseño de dichas modificaciones dentro de las estrategias tradicionales de control de un aerogenerador y su análisis en lazo cerrado se ha llevado a cabo utilizando el software **MATLAB**. La información dinámica de las plantas utilizadas para poder llevar a cabo el diseño de control se ha obtenido gracias a un proceso de linealización del modelo no-lineal desarrollado en FAST. A su vez, es importante destacar que, para poder llevar a cabo el diseño de estas modificaciones de control, previamente es necesario el modelado de los retardos de comunicación y de la dinámica de los actuadores, aspecto que también se ha abordado a lo largo de este proyecto.

Para la realización de las distintas simulaciones se emplea el código aerolástico FAST. Además, a través de MATLAB, se realiza una estimación de cargas extremas y a fatiga con la que se evalúan los distintos resultados obtenidos. Estas simulaciones de carga se establecen mediante la **norma IEC 61400-1**, por lo que se realizan en condiciones cuasi realistas.

Los resultados obtenidos a través del modelo teórico linealizado y a través de las diversas simulaciones realizadas indican una mejora en la inmunidad de los sistemas de control a los retrasos mencionados anteriormente. En concreto, se ha conseguido hacer que el **controlador** sea **más robusto** frente a diferentes tipos de retrasos y disminuir las cargas a las que está sometido el aerogenerador.

Finalmente, hay que decir que este proyecto se complementa con el documento **Complemento Trabajo Fin de Máster titulado “Simulación mecánica de incertidumbre en sistema de comunicaciones y actuadores de un aerogenerador”**. En este documento se encuentra el **estudio a fatiga** mencionado en este TFM.

## ABSTRACT

This Master Thesis has been carried out in the company Siemens Gamesa R.E. located in Pamplona (Navarra, Spain), dedicated to the field of wind energy. The work is framed within the existing collaboration in between the Dynamic Systems and Control Research Group at the Public University of Navarre (UPNA) and Siemens Gamesa since 2014. More specifically, it has been accomplished in the Department of Technology, within the area of control.

This Thesis originates as a result of a real problem in the industrial sector that arises once the wind turbines are installed and started. Due to the communication delays and the dynamics of the actuators, different fatigue loadings might appear in the system. As a consequence, the well-functioning of the generator and the lifetime of several components might be compromised.

In order to tackle this problem, this project proposes different alternatives for the reduction of the effects of the delays through the improvement of the control strategies of the machine. In particular, this work proposes several modifications to the traditional control strategy of the wind turbine in order to increase the immunity of the controls to the effects of the delays due to communication and the actuators in the pitch control loop. The final objective is to improve the functioning of the wind turbine system by reducing the fatigue loading and, thus, augmenting the lifetime of several wind turbine components.

In order to redesign these control strategies, a specific wind turbine model called UPWIND has been under study. This wind turbine has a rated power of 5MW and, as its name indicates, its blades are positioned upwind (in front of the tower). The machine has a variable velocity characteristic and is located onshore. The UPWIND model has been developed using the aeroelastic code FAST, a publicly available software offered by NREL (National Renewable Energy Laboratory).

The control strategy used as a reference in this project is the one developed by Asier Díaz de Corcuera in [3]. The different control strategies proposed in here have been included in the source code developed in that Doctoral Thesis through a coding procedure in C and the generation of the corresponding dll libraries. The design of the mentioned modifications of the traditional control strategies and their closed-loop analysis has been undertaken in the software MATLAB. The dynamic information of the system plants has been obtained thanks to a linearization procedure of the non-linear model developed in FAST. Moreover, it is important to mention that in order to conceive these control modifications, previously it is necessary to model the communication delays and the actuators dynamics, issue which has also been accomplished in this work.

In order to carry out the different simulations the aeroelastic code FAST has been used. Additionally, with the use of MATLAB an estimation of the possible extreme loadings and fatigue loadings has been addressed, with which it is possible to evaluate the obtained results. These loading simulations have been established through the standard IEC 61400-1, so they have been executed in cuasi-realistic conditions.

The results obtained through the linearized theoretical model and through the different simulations indicate a significant improvement in the immunity of the control systems to the previously-mentioned delays. More specifically, the controller has been made more robust in the face of the delays and the loads to which the wind turbine is subjected.

Finally, it is important to mention that this project is complemented with the document Compliment to the Master Thesis, with the title “Mechanical Simulation of the Uncertainty in the Communication Systems and Actuators in a Wind Turbine”. In this document it is possible to find the fatigue study mentioned in this Master Thesis.



## **PALABRAS CLAVE**

- Aerogeneradores
- Retraso
- Pitch
- Velocidad del generador
- Potencia
- Cargas a fatiga
- Estrategia de control
- Lazo de pitch o control del pitch
- Ancho de banda
- Pico
- Márgenes de estabilidad
- Bode
- Respuesta escalón



## ÍNDICE

|  |     |
|--|-----|
| AGRADECIMIENTOS.....   | 1   |
| RESUMEN.....   | 3   |
| ABSTRACT .....   | 5   |
| PALABRAS CLAVE .....   | 7   |
| ÍNDICE .....   | 9   |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....   | 11  |
| ÍNDICE DE TABLAS.....  | 17  |
| 1. INTRODUCCIÓN .....  | 19  |
| 2. OBJETIVOS .....   | 21  |
| 3. ENERGÍA EÓLICA.....   | 22  |
| 3.1 Historia.....  | 22  |
| 3.2 Estado de desarrollo Mundial y Nacional .....                        | 24  |
| 3.3 Viento.....  | 26  |
| 3.4 Elementos de un aerogenerador .....                                  | 28  |
| 3.5 Estructura de un aerogenerador .....                                 | 34  |
| 3.6 Comunicaciones y actuadores del aerogenerador .....                  | 36  |
| 4. MODELADO DEL AEROGENERADOR .....                                      | 40  |
| 4.1 Funcionamiento de la herramienta FAST .....                          | 40  |
| 4.2 Modelo aerogenerador de referencia .....                             | 42  |
| 4.3 Modelo linealizado.....  | 49  |
| 5. CONTROL DEL AEROGENERADOR .....                                       | 54  |
| 5.1 Introducción al control de un aerogenerador .....                    | 54  |
| 5.2 Control elegido como referencia (Baseline) .....                     | 59  |
| 6. ESTUDIO TEÓRICO DE LA INFLUENCIA DE RETRASOS EN EL LAZO DE PITCH..... | 72  |
| 6.1 Modelado del retraso .....   | 72  |
| 6.2 Estudio del retraso en el lazo cerrado .....                         | 74  |
| 7. CÓDIGO FUENTE DEL CONTROLADOR .....                                   | 105 |
| 7.1 Explicación del código fuente del control de referencia .....        | 105 |
| 7.2 Inclusión de los retrasos en el código fuente .....                  | 105 |
| 8. PROPUESTAS DE MEJORA DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL .....                | 108 |
| 8.1 Propuesta de mejora 1: limitación de pitch.....                      | 108 |

|   |     |
|---|-----|
| 8.2 Propuesta de mejora 2: filtro Lead-Lag .....                        | 110 |
| 8.3 Propuesta de mejora 3: filtro Lead - Lag con ganancia variable..... | 118 |
| 9. CONCLUSIONES: ANÁLISIS DE CONTROL.....                               | 120 |
| 10. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS .....                                     | 130 |
| 11. LÍNEAS FUTURAS .....  | 132 |
| 12. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....                                    | 134 |
| ANEXOS.....   | 136 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1 Molino de viento persa S.VIII. Fuente [15].  | 22 |
| Fig. 2 Primer aerogenerador. Fuente [15].   | 22 |
| Fig. 3 Aerogeneradores actuales   | 23 |
| Fig. 4 Potencia instalada acumulada en 2016 a nivel mundial. Fuente [16]  | 24 |
| Fig. 5 Cobertura de demanda de España de energía eléctrica en 2017. Fuente [16]   | 25 |
| Fig. 6 Evolución potencia eólica instalada en MW y lo instalado cada año en España. Fuente [16]                               | 25 |
| Fig. 7 Variación de la velocidad del viento en función de los obstáculos. Fuente [15].  | 27 |
| Fig. 8 Disposición barlovento y sotavento.  | 29 |
| Fig. 9 Palas aerogenerador. Fuente [15].  | 29 |
| Fig. 10 Representación vena fluida rotor eléctrico. Fuente [15].  | 30 |
| Fig. 11 Curvas del coeficiente de potencia para distintos tipos de aerogeneradores. Fuente [15].                              | 32 |
| Fig. 12 Componentes ubicados en la góndola. Fuente [15].  | 33 |
| Fig. 13 Montaje de una torre tubular de acero   | 34 |
| Fig. 14 Esquema de la estructura de un aerogenerador. Fuente [15].  | 34 |
| Fig. 15 Armario en la nacelle donde se encuentra el PC y los diferentes elementos para el control de la máquina. Fuente [14]. | 36 |
| Fig. 16 Esquema 1 comunicaciones para el control del pitch. Fuente [14].  | 37 |
| Fig. 17 Esquema 2 comunicaciones para el control del pitch. Fuente [14].  | 37 |
| Fig. 18 Esquema 3 comunicaciones para el control del pitch. Fuente [14].  | 38 |
| Fig. 19 Actuador hidráulico. Fuente [2].  | 39 |
| Fig. 20 Actuador eléctrico. Fuente [2].   | 39 |
| Fig. 21 Esquema de la herramienta FAST  | 41 |
| Fig. 22 Ejemplo fichero de texto para la geometría de la pala del aerogenerador. Fuente [13]                                  | 46 |
| Fig. 23 Sistema de coordenadas de la parte superior de la torre. Fuente [13].   | 47 |
| Fig. 24 Sistema de coordenadas de la base de la torre. Fuente [13]  | 47 |
| Fig. 25 Sistema de coordenadas de las palas. Fuente [13].   | 47 |
| Fig. 26 Sistema de coordenadas del tren de potencia. Fuente [13].   | 47 |
| Fig. 27 Algunos grados de libertad de los aerogeneradores. Fuente [3]   | 47 |
| Fig. 28 Curva P-N.  | 49 |
| Fig. 29 Curva de potencia   | 49 |
| Fig. 30 Velocidad de viento vs pitch  | 49 |
| Fig. 31 Esquema de linealizar de FAST.  | 50 |
| Fig. 32 Bode par - velocidad generador a los puntos de operación.   | 51 |
| Fig. 33 Bode pitch – velocidad del generador a los puntos de operación  | 52 |
| Fig. 34 Bode velocidad viento - velocidad generador a los puntos de operación.  | 52 |
| Fig. 35 Bode velocidad viento – aceleración torre a los puntos de operación   | 53 |
| Fig. 36 Bode pitch – aceleración torre a los puntos de operación  | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Fig. 37 Curva de potencia .....  | 55 |
| Fig. 38 Curva P-N. Fuente [3] .....  | 56 |
| Fig. 39 Curvas $C_p$ en función de $\lambda$ y del ángulo de pitch .....   | 57 |
| Fig. 40 Esquema lazo de control de par.....  | 58 |
| Fig. 41 Esquema lazo de control de pitch .....   | 59 |
| Fig. 42 Esquema componentes controlador y la planta .....  | 60 |
| Fig. 43 Diagrama de bode del DTD .....   | 61 |
| Fig. 44 Diagrama de bode del controlador de par.....   | 62 |
| Fig. 45 Diagrama de bode del ATD .....   | 63 |
| Fig. 46 Diagrama de bode de los filtros del controlador del pitch .....  | 64 |
| Fig. 47 Representación del valor de $K_p$ y $K_i$ del controlador de pitch en función del pitch .....                        | 65 |
| Fig. 48 Diagrama de bode del control de pitch .....  | 65 |
| Fig. 49 Bode par - velocidad del generador en el punto de operación a 7 m/s .....  | 66 |
| Fig. 50 Bode par - velocidad del generador en el punto de operación a 11 m/s .....   | 67 |
| Fig. 51 Bode pitch - aceleración de la torre en el punto de operación a 13 m/s .....   | 68 |
| Fig. 52 Bode pitch - velocidad del generador en el punto de operación a 13 m/s .....   | 68 |
| Fig. 53 Bode pitch - aceleración de la torre en el punto de operación a 19 m/s .....   | 69 |
| Fig. 54 Bode pitch - velocidad del generador en el punto de operación a 19 m/s .....   | 70 |
| Fig. 55 Bode pitch - aceleración de la torre en el punto de operación a 25 m/s .....   | 70 |
| Fig. 56 Bode pitch - velocidad del generador en el punto de operación a 25 m/s .....   | 71 |
| Fig. 57 Ejemplo retraso respecto a la referencia de pitch.....   | 73 |
| Fig. 58 Diagrama de bode de retrasos.....  | 74 |
| Fig. 59 Esquema sistema con retrasos a la salida de la planta.....   | 76 |
| Fig. 60 Esquema sistema con retrasos en la demanda de pitch .....  | 77 |
| Fig. 61 Lazo Abierto (Punto de operación a 19m/s) .....  | 79 |
| Fig. 62 Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                       | 80 |
| Fig. 63 Zoom Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                  | 80 |
| Fig. 64 Sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                           | 81 |
| Fig. 65 Zoom Sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                      | 82 |
| Fig. 66 Efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s).....                                | 83 |
| Fig. 67 Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s).....      | 83 |
| Fig. 68 Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)..... | 84 |

|  |    |
|--|----|
| Fig. 69 Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento a perturbaciones lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s).....       | 84 |
| Fig. 70 Zoom respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s).....                 | 85 |
| Fig. 71 Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s).....              | 85 |
| Fig. 72 Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s).....         | 86 |
| Fig. 73 Lazo Abierto (Punto de operación a 19m/s).....   | 87 |
| Fig. 74 Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                       | 88 |
| Fig. 75 Zoom sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                  | 88 |
| Fig. 76 Sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                           | 90 |
| Fig. 77 Zoom sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                      | 90 |
| Fig. 78 Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 19 m/s)  | 92 |
| Fig. 79 Zoom sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 19 m/s).....                                | 92 |
| Fig. 80 Efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s).....                                | 94 |
| Fig. 81 Zoom efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s).....                           | 94 |
| Fig. 82 Efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 19 m/s) .....   | 95 |
| Fig. 83 Zoom efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 19 m/s) .....  | 95 |
| Fig. 84 Efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s) .....                               | 96 |
| Fig. 85 Zoom efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s).....                           | 96 |
| Fig. 86 Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s).....      | 97 |
| Fig. 87 Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)..... | 97 |
| Fig. 88 Respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                 | 97 |
| Fig. 89 Zoom respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....            | 97 |
| Fig. 90 Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s).....              | 99 |

|   |     |
|---|-----|
| Fig. 91 Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s).....        | 99  |
| Fig. 92 Respuesta escalón efecto del viento sobre aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s).....                | 101 |
| Fig. 93 Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre aceleración de la torre (Punto de operación a 19m/s).....            | 101 |
| Fig. 94 Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación 19 m/s) .....                                | 103 |
| Fig. 95 Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación 19 m/s).....                            | 103 |
| Fig. 96 Esquema ejemplo de cómo se generan los retrasos .....   | 106 |
| Fig. 97 Velocidad de viento respecto del tiempo empleado en las simulaciones .....  | 108 |
| Fig. 98 Pitch respecto del tiempo del control de referencia en simulación.....  | 109 |
| Fig. 99 Comparación del pitch respecto del tiempo de la planta de referencia y de la planta con limitación de pitch .....   | 110 |
| Fig. 100 Comparación diagrama de bode del lazo abierto de la referencia y con un retraso de 50 steps .....                  | 111 |
| Fig. 101 Zoom comparación diagrama de bode del lazo abierto de la referencia y con un retraso de 50 steps .....             | 111 |
| Fig. 102 Diagrama de bode del Lead – Lag .....  | 113 |
| Fig. 103 Diagrama de bode del Lead-Lag sin ganancia y con ganancia .....  | 114 |
| Fig. 104 Esquema del nuevo sistema de la estrategia de control con la mejora 2 .....  | 114 |
| Fig. 105 Modelo realizado en SIMULINK para validar la mejora 2 .....  | 116 |
| Fig. 106 Validación mejora 2 .....  | 117 |
| Fig. 107 Zoom Validación mejora 2 .....   | 117 |
| Fig. 108 Valor de la ganancia en función del pitch .....  | 119 |
| Fig. 109 Comparación lazo abierto con la mejora 2 .....   | 120 |
| Fig. 110 Zoom Comparación lazo abierto con la mejora 2 .....  | 121 |
| Fig. 111 Comparación Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch con la mejora 2 .....                      | 122 |
| Fig. 112 Zoom Comparación Sensibilidad de seguimiento con la mejora 2 .....   | 122 |
| Fig. 113 Comparación Sensibilidad de rechazo a perturbaciones con la mejora 2 .....   | 123 |
| Fig. 114 Zoom Comparación Sensibilidad de rechazo a perturbaciones con la mejora 2 .....                                    | 124 |
| Fig. 115 Comparación Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD .....  | 125 |
| Fig. 116 Comparación Efecto del viento en el pitch con la mejora 2 .....  | 125 |
| Fig. 117 Comparación Efecto del viento en la velocidad del generador con la mejora 2 .....                                  | 126 |
| Fig. 118 Comparación Efecto del viento en la aceleración de la torre con la mejora 2 .....                                  | 126 |
| Fig. 119 Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de la referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)..... | 127 |



|  |     |
|--|-----|
| Fig. 120 Zoom Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de la referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)..... | 127 |
| Fig. 121 Respuesta escalón sensibilidad a rechazo de perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s).....          | 128 |
| Fig. 122 Zoom Respuesta escalón sensibilidad a rechazo de perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s).....     | 129 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1 Clasificación de las turbinas en función de la velocidad del viento según la norma IEC 61400-1 .....                    | 27  |
| Tabla 2 Propiedades generales del aerogenerador.....  | 42  |
| Tabla 3 Propiedades de las palas del aerogenerador.....   | 43  |
| Tabla 4 Propiedades del buje y de la góndola del aerogenerador.....   | 43  |
| Tabla 5 Propiedades del tren de potencia y del generador eléctrico del aerogenerador .....                                      | 44  |
| Tabla 6 Propiedades de la torre del aerogenerador .....   | 44  |
| Tabla 7 Propiedades del control del aerogenerador.....  | 45  |
| Tabla 8 Frecuencias naturales del aerogenerador. Fuente [3]. .....  | 48  |
| Tabla 9 Datos márgenes de estabilidad del Lazo Abierto (Punto de operación a 19m/s) .....                                       | 79  |
| Tabla 10 Datos sensibilidad de seguimiento del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s).....                                  | 81  |
| Tabla 11 Datos sensibilidad de rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s).....                     | 82  |
| Tabla 12 Datos respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)..... | 84  |
| Tabla 13 Datos respuesta escalón sensibilidad de rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s).....   | 85  |
| Tabla 14 Datos respuesta escalón efecto del viento en la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s).....             | 86  |
| Tabla 15 Datos márgenes de estabilidad del Lazo Abierto (Punto de operación a 19m/s) .....                                      | 87  |
| Tabla 16 Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                         | 89  |
| Tabla 17 Sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                             | 91  |
| Tabla 18 Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 19 m/s) .....                                      | 93  |
| Tabla 19 Respuesta escalón sensibilidades del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                                  | 98  |
| Tabla 20 Respuesta escalón efecto del viento en la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s).....                   | 100 |
| Tabla 21 Respuesta escalón efecto del viento en la aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s).....                   | 102 |
| Tabla 22 Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 19 m/s).....                                  | 104 |
| Tabla 23 Comparación márgenes de estabilidad de la referencia y con un retraso de 50 steps.....                                 | 111 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 24 Márgenes de estabilidad del Lazo Abierto .....  | 118 |
| Tabla 25 Comparación márgenes de estabilidad del Lazo Abierto con la mejora 2 ....                   | 121 |
| Tabla 26 Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch .....                           | 123 |
| Tabla 27 Comparación sensibilidad de rechazo a perturbaciones del lazo de pitch con la mejora 2..... | 124 |
| Tabla 28 Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch .....         | 128 |
| Tabla 29 Respuesta escalón sensibilidad a rechazo de perturbaciones del lazo de pitch .....          | 129 |

## 1. INTRODUCCIÓN

La **estrategia de control** es el pilar del funcionamiento del aerogenerador por influir tanto en la captación de energía del viento a través de las palas, como en las cargas a fatiga a las que están sometidos cada uno de los componentes del aerogenerador. Por ello, resulta fundamental desarrollar una estrategia de control robusta ante cualquier perturbación que pueda existir en el sistema capaz de conseguir ambos objetivos en cualquier punto de operación (velocidad del viento) del aerogenerador.

El **incremento del tamaño de los aerogeneradores** propone nuevos retos para el diseño de nuevas estrategias de control. Actualmente, los aerogeneradores ya tienen potencias tan elevadas como 5-7 MW, alturas de torre de más de 100 metros y diámetros de rotor entorno a los 120 y 130 metros. Por tanto, se deben diseñar estrategias de control adaptadas a estas nuevas máquinas, preparadas para la mitigación de cargas en los componentes del aerogenerador y conseguir captar la mayor cantidad de energía del viento.

En las estrategias de control de los aerogeneradores resulta fundamental que, tanto recibir como mandar información y órdenes de actuación, se haga de manera prácticamente instantánea, con el objetivo de captar en todo momento la mayor cantidad de energía del viento posible y aumentar la vida útil del aerogenerador. Sin embargo, en la realidad esto no es posible debido a los diferentes elementos encargados de transmitir dichos datos.

Además, como consecuencia del aumento de tamaño de los aerogeneradores surgen diferentes **problemáticas en la estrategia de control** a tener en cuenta. Por ejemplo, el control del pitch y de par es más lento, ya que las palas son mayores tanto en superficie como en volumen.

Los elementos que son culpables de la mayor parte de estos **retrasos** son los distintos sensores, redes de comunicación, actuadores... Por tanto, podemos dividir estos retrasos en los que surgen como consecuencia de las comunicaciones del aerogenerador y los debidos a la dinámica de los actuadores.

Los **retrasos debidos a las comunicaciones** son retrasos que surgen debido a los sensores (acelerómetro, sensor de velocidad del rotor...), y redes de comunicación. Además, la cantidad de retrasos aumenta si existen errores en las comunicaciones y por el deterioro de los diferentes componentes. El orden de magnitud total de dichos retrasos se encuentra en torno a los milisegundos.

Los **retrasos debidos a la dinámica de los actuadores**, tanto en el de par como en el de pitch, surgen como consecuencia de tener que interferir de manera mecánica en el funcionamiento del aerogenerador. Al igual que en el caso anterior, la mala calidad de los actuadores y su deterioro afectan de manera significativa en la aparición de

retrasos. Estos retrasos son mayores que los de las comunicaciones, debido a que cualquier manipulación mecánica supone un mayor tiempo de actuación que una intervención eléctrica o electrónica, pudiendo alcanzar valores de medio segundo.

La aparición de retrasos dentro del sistema influye en que la capacidad de respuesta una vez leída la velocidad del generador y la aceleración de la torre es más lenta. Al ser el control más lento, las oscilaciones en la potencia generada son mayores en los distintos componentes del aerogenerador provocando obtener menos energía y aumentando las cargas, lo cual se traduce en que la vida útil del aerogenerador se reduce. El resultado es el mismo, en el caso de los retrasos que se tienen en el actuador de pitch.

Centrándonos dentro de la estrategia de control del aerogenerador, estos retrasos se pueden presentar tanto en el lazo de par como en el lazo de pitch. El presente documento se enmarca dentro del lazo de pitch, donde se analizan los diferentes retrasos que pueden darse y se implementa una mejora dentro de la estrategia de control del lazo de pitch tradicional.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este **Trabajo Fin de Máster** titulado “Modelado de incertidumbre en sistemas de comunicaciones de un aerogenerador y diseño de algoritmos de control inmunes a sus efectos” es **diseñar y comparar** una estrategia de control de pitch tradicional y una inmune a los efectos que producen los **retrasos** en las comunicaciones y dinámica de los actuadores para el control del pitch. Se tiene en cuenta la necesidad de reducir las cargas con la implantación de esta nueva estrategia de control.

A continuación, se presentan los distintos objetivos de este Trabajo Fin de Máster:

- Aprendizaje de la herramienta **FAST** de NREL.
- Aprendizaje de la **estrategia de control** tradicional de un aerogenerador.
- Modelado del **efecto de los retrasos** debidos a las **comunicaciones y actuadores** del aerogenerador.
- Mejorar el control del pitch haciéndolo más **inmune a la influencia de los retrasos** en las comunicaciones del aerogenerador y en los sistemas de actuación.
- Mejorar las **cargas a fatiga** de varios componentes del aerogenerador respecto a las que sufren teniendo en cuenta los retrasos para aumentar su vida útil.

### 3. ENERGÍA EÓLICA

Este Trabajo Fin de Máster se ha desarrollado en el campo de la energía eólica, en el marco de las energías renovables. A continuación, se muestra la importancia de la energía eólica a lo largo de los siglos, así como su propia evolución. Además, se verán los distintos componentes necesarios para poder utilizar esta energía para poder obtener energía eléctrica. La mayoría de información referente a este punto se ha obtenido de [15].

#### 3.1 Historia

La energía eólica junto la energía térmica son las energías más antiguas. Al principio, la energía eólica se aprovechaba para la navegación y así surgieron los primeros veleros.

En el siglo VIII surgieron en Persia los primeros molinos y ya en el siglo XII se extienden por toda Europa los molinos de eje horizontal para moler el trigo. En los países bajos con el fin de bombear agua y drenar así el terreno surgieron los molinos de bombeo.



Fig. 1 Molino de viento persa S.VIII. Fuente [15].

De hecho, no es hasta 1888 cuando surge la primera turbina eólica para generación de electricidad, el primer aerogenerador, creado por Charles F. Brush. Tenía un funcionamiento automático, 12 kW, un diámetro de rotor de 17 metros y 144 palas.

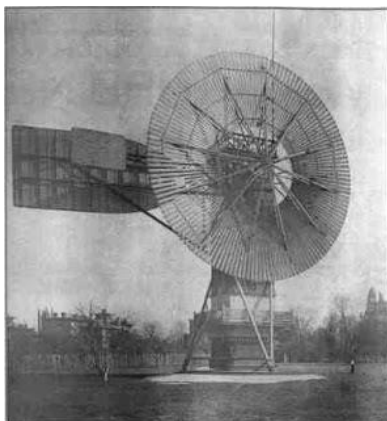


Fig. 2 Primer aerogenerador. Fuente [15].



Poul la Cour (1846-1908) fue el pionero de la energía eólica y apostó por las turbinas eólicas modernas constituidas por pocas palas y por un giro rápido. Surgiendo en 1918 los primeros generadores de 20 a 35 kW.

El gran resurgimiento de la tecnología basada en el aprovechamiento de las fuentes renovables y en concreto del viento, es en 1973 con la crisis del petróleo. En este periodo se impulsó el ahorro energético y a las energías renovables. Por ello, se ha llegado a tener los actuales aerogeneradores capaces de producir electricidad a precios competitivos con las fuentes energéticas convencionales a partir de una fuente natural, no contaminante y renovable.

En los años 90 se produce un gran avance eólico debido a distintos factores:

- Políticas estatales de ayuda.
- Desarrollo exponencial de la energía eólica.
- Continuo aumento del tamaño de las máquinas.
- Bajada constante de los costes, debido a los nuevos métodos de fabricación, economías de escala, introducción informática y el desarrollo de la electrónica de potencia.

Para el final de esta década se consiguieron modelos de 600-800kW y unos prototipos de hasta 2MW.

En la actualidad se sigue desarrollando esta forma de obtener energía a partir del viento mediante:

- Aumento de la potencia teniendo aerogeneradores de 5 y 7 MW.
- Parques offshore (aerogeneradores en el mar).
- Integración en la red eléctrica mediante la contribución a los servicios de la red y no desconexión y ayudar a la red durante huecos de tensión.



**Fig. 3 Aerogeneradores actuales**

### 3.2 Estado de desarrollo Mundial y Nacional

A finales del año 2001 la potencia mundial de origen eólico superaba los 23 GW creciendo cada año aproximadamente en torno a un 30%.

El futuro que le espera a la energía eólica en el mundo es muy prometedor ya que todo parece indicar que va a seguir siendo la principal apuesta en nueva capacidad de generación eléctrica de aquí al 2020, tanto en Europa como en muchas otras regiones incluidas EEUU y China.

Por ello, resulta evidente que la energía eólica instalada en el mundo siga creciendo. Por ejemplo, en 2016 creció un 12.4%, hasta situarse en 486.749 MW, según datos del Global Wind Energy Council (GWEC). China, Estados Unidos, Alemania, India y España son los primeros productores mundiales. En la fig.4 se muestra dicha evolución a lo largo de los años.

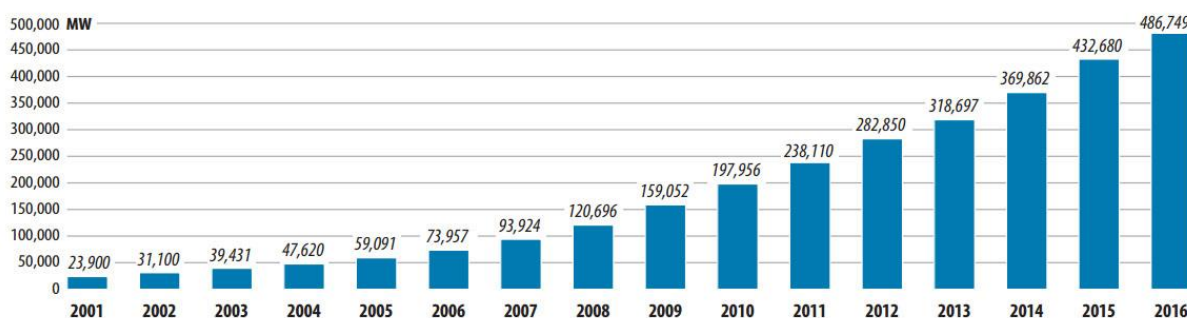


Fig. 4 Potencia instalada acumulada en 2016 a nivel mundial. Fuente [16]

España es un país con una gran dependencia energética de otros países ya que tan solo existen yacimientos de carbón y de poca calidad. Por ello, España cuenta con una tecnología de aerogeneradores muy desarrollada y resulta muy competitiva tanto en calidad como en precio, frente a la de los líderes mundiales.

En 2016, la eólica cubrió el 19,3% de la demanda eléctrica peninsular siendo la segunda tecnología en el sistema eléctrico español. De hecho, hoy en día, la energía eólica podría abastecer el consumo de electricidad del 60.6% de los hogares españoles.

La potencia instalada total hasta el año 2017 es de 23.121 MW. La eólica fue la segunda tecnología en el sistema eléctrico en 2017, con una producción de 47.886 GWh y una cobertura de demanda del 18.2%. En la fig. 5 se muestra el porcentaje de cobertura de demanda de cada tipo de tecnología para obtener energía eléctrica.

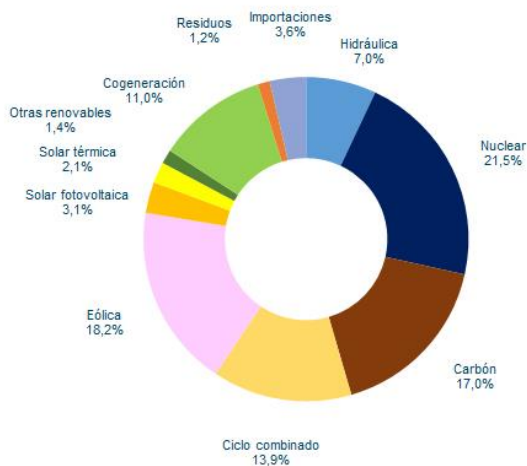


Fig. 5 Cobertura de demanda de España de energía eléctrica en 2017. Fuente [16]

Además, en el sector eólico en España trabajan 22.468 personas. Exporta tecnología por valor de 2.574 millones de euros al año. Invierte en I+D alrededor de 85.5 millones de euros anuales y la eólica aporta directa o indirectamente el 0.25% del PIB.

A continuación se muestra la evolución de la potencia eólica instalada en MW y lo que se ha instalado en total cada año en España:

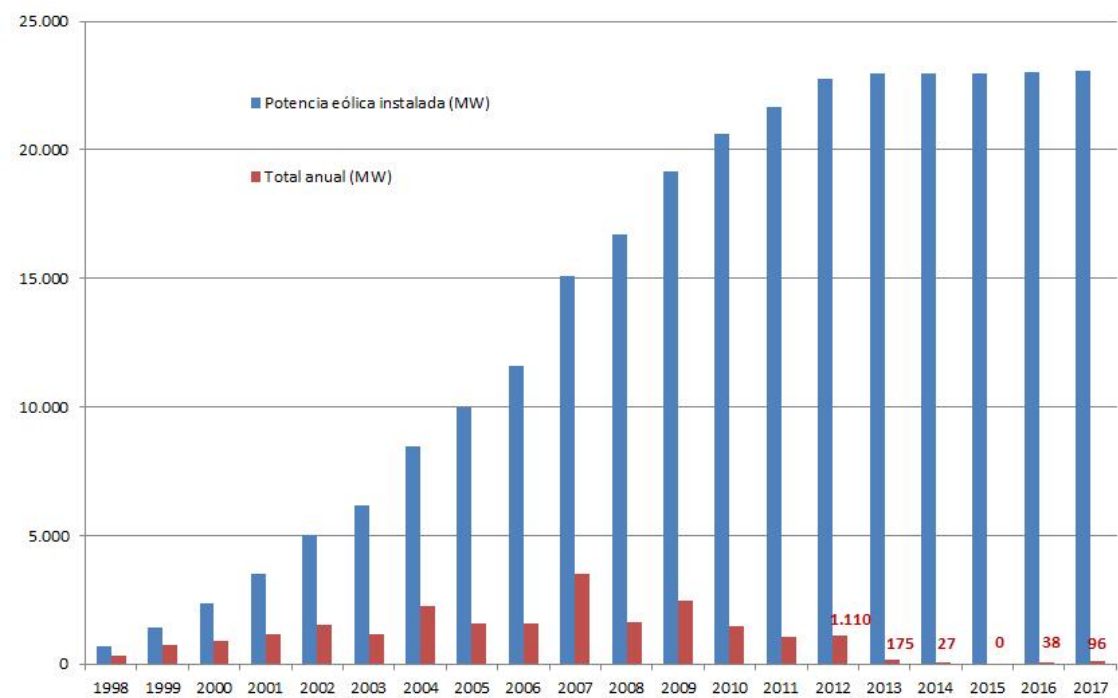


Fig. 6 Evolución potencia eólica instalada en MW y lo instalado cada año en España. Fuente [16]

Se aprecia en la fig. 6, el estancamiento que hay desde 2012 en la potencia eólica instalada. Sin embargo, este año (2018) se va a volver a instalar en España más potencia proveniente del sector eólico.

### 3.3 Viento

El viento es el movimiento de una masa de aire presente en la atmósfera. Se origina principalmente por el calentamiento desigual de la Tierra, por la propia rotación de la Tierra y por los obstáculos y configuraciones orográficas.

El viento es un vector con módulo, dirección y sentido:

- **Módulo:** fuerza o intensidad que tiene el viento expresada en m/s, km/h o nudos.
- La **dirección** y el **sentido** se expresan en grados sexagesimales.

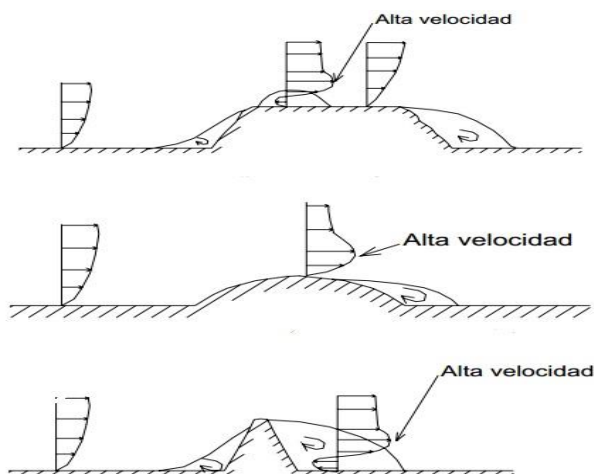
Por tanto, el viento es variable tanto espacialmente como temporalmente. En cuanto a su variación temporal, suele tener ciclos correspondientes con las estaciones, los días, las perturbaciones y las ráfagas. Espacialmente puede variar verticalmente o por obstáculos en el terreno:

- **Variación vertical:** es debida principalmente al rozamiento que se da entre la corriente de aire y la superficie terrestre. Para cada altura existe una velocidad de viento y están relacionadas mediante la siguiente expresión:

$$U(h_2) = U(h_1) \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^a$$

Donde  $a=0.2$  en el mar,  $0.16$  en un llano,  $0.28$  en un bosque y  $0.4$  en una zona urbana.

- **Obstáculos en el terreno:** la superficie terrestre no es lisa lo que provoca las variaciones de la velocidad de viento. Además, en función del tipo de elevación, puede aumentar la velocidad del viento si son suaves o disminuir su velocidad, si por el contrario, se trata de crestas o bordes agudos.



**Fig. 7 Variación de la velocidad del viento en función de los obstáculos. Fuente [15].**

Como sabemos, el viento es una fuente de energía renovable que se logra aprovechar gracias al empleo de los aerogeneradores. Por ello, resulta imprescindible conocer las características del viento para saber qué tipo de turbina se ha de instalar en cada zona. La norma IEC61400-1 realiza dicha clasificación tanto en función de la velocidad del viento como una subclasificación en función de las turbulencias con las que puede trabajar. Esta subclasificación divide a las turbinas en A y B. En las dos tablas inferiores se muestra las dos catalogaciones descritas anteriormente:

**Tabla 1 Clasificación de las turbinas en función de la velocidad del viento según la norma IEC 61400-1**

| Clase de turbina       | Viento medio | Viento extremo |
|------------------------|--------------|----------------|
| <b>I: High wind</b>    | 10 m/s       | 70,0 m/s       |
| <b>II: Medium wind</b> | 8,5 m/s      | 59,5 m/s       |
| <b>III: Low wind</b>   | 7,5 m/s      | 52,5 m/s       |
| <b>IV</b>              | 6,0 m/s      | 42,0 m/s       |

Donde el viento extremo es la racha máxima esperable en 50 años.

**Tabla 2 Subclasificación de las turbinas en función de la turbulencia con la que pueden trabajar según la norma IEC 61400-1**

| Subclase | Turbulencia |
|----------|-------------|
| <b>A</b> | 18%         |
| <b>B</b> | 16%         |

Resulta muy interesante conocer también la cantidad de viento existente en una zona. Este término se conoce como horas equivalentes. Estas horas equivalentes representan el número de horas al año que la instalación funciona a pleno

rendimiento. Una zona media-buena cuenta con aproximadamente 2500 horas equivalentes y una zona muy buena con 3500 horas.

Como consecuencia, surge el término factor de capacidad que representa el porcentaje de energía que se produce realmente con la teórica producible en un mismo periodo. En una zona media-buena este factor de capacidad es aproximadamente el 28%.

### 3.4 Elementos de un aerogenerador

A continuación, se va a citar y describir los distintos elementos que componen un aerogenerador:

- Rotor eólico
- Góndola
- Torre

La información recogida en este apartado se ha obtenido de [15].

#### 3.4.1 Rotor eólico

El rotor de un aerogenerador está compuesto por las palas, el buje y el mecanismo de cambio de paso de la pala. Se encarga de captar la energía del viento y transformarla en movimiento.

Dependiendo del número de palas del rotor y de su posición respecto del eje de giro, se pueden clasificar en turbinas con rotor de eje vertical y turbinas con rotor de eje horizontal. Además, dependiendo del número de palas existen rotores multipala o rotores tipo hélice. Los primeros pueden poseer de 6 a 24 palas y por tanto una elevada solidez. Los segundos, pueden girar a una velocidad superior que los multipala. La velocidad lineal en la punta de la pala en los de tipo hélice puede variar dentro de un margen de 6 a 14 veces la velocidad del viento incidente en condiciones de diseño por lo que resultan altamente atractivas para la generación de electricidad. Las turbinas multipala resultan interesantes para aplicaciones como bombeo directo ya que presentan un mayor par de arranque.

Cabe destacar que las turbinas de eje horizontal de dos o tres palas son las más eficientes en comparación con el coste. Además, cuanto menor es el número de palas más planas son las curvas de  $C_p$  (coeficiente de potencia). Este parámetro mide la fracción de la potencia del viento que se aprovecha y se demostrará más adelante.

En este documento, se va a explicar el rotor con tres palas y de eje horizontal, por ser el más habitual en el mercado de generación eléctrica. También porque el aerogenerador simulado posee dichas características, tal y como se mostrará en el capítulo 4.

Los rotores con este tipo de eje giran sus palas en dirección perpendicular a la dirección del viento incidente. De esta forma las turbinas pueden diseñarse para que funcionen en la configuración de barlovento (delante de la góndola) o a sotavento (detrás de la góndola). Las dos configuraciones se muestran en la fig. 8.

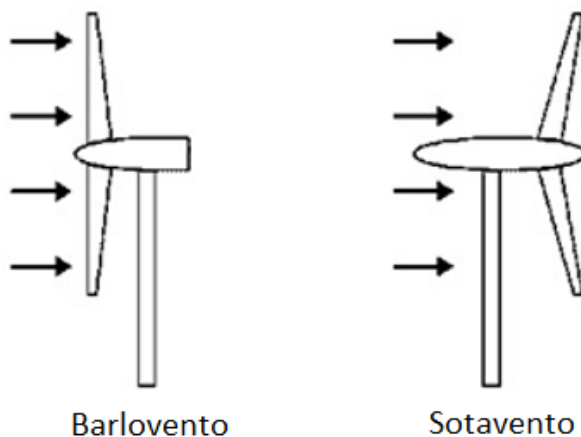


Fig. 8 Disposición barlovento y sotavento

La principal diferencia entre los dos tipos de configuraciones reside en que a barlovento es necesario un sistema de orientación activo ya que el viento primero incide sobre el rotor eólico y luego sobre la torre. Sin embargo, a sotavento, se emplea un sistema de orientación pasivo el cual consiste en inclinar las palas ligeramente tal y como puede apreciarse en la fig. 8. Esta última configuración permite que la góndola se oriente de forma automática en la dirección del viento pero el tren mecánico sufre a fatiga debido a los cambios de dirección.

#### - **Palas.**

Durante los primeros años las palas estaban fabricadas de acero aunque actualmente se utiliza fibra de vidrio. Suponen el componente de mayor coste del aerogenerador (20-30%).

Tienen un perfil aerodinámico con una geometría específica y compleja para optimizar el rendimiento aerodinámico del aerogenerador. Su peso ha de ser reducido y presentar buen comportamiento mecánico.



Fig. 9 Palas aerogenerador. Fuente [15].

En los aerogeneradores más grandes, las palas pueden girar para modificar el ángulo que forman con el viento. Este cambio de ángulo se denomina ángulo de paso variable o ángulo de pitch.

Hay que tener en cuenta que no toda la potencia que tiene el viento por el hecho de estar en movimiento es aprovechable o recogida por las palas. El aerogenerador no recoge toda la energía cinética disponible en el viento. Para poder saber el rendimiento de las palas primero se debe conocer dicha potencia disponible en el viento. Por ello, se ha de conocer la masa de aire por unidad de tiempo que atraviesa el rotor eólico, que sigue la siguiente expresión:

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU$$

Esa masa posee una energía cinética ( $E_c$ ) por el hecho de estar en movimiento:

$$E_c = \frac{1}{2} m U^2$$

Por tanto, la potencia disponible del viento  $P_d$  se puede expresar de la siguiente forma:

$$P_d = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 = \frac{1}{2} \rho AU^3$$

Se observa que la potencia disponible es proporcional a la densidad del aire, la cual en condiciones estándar (nivel del mar y 15°C) es igual a 1.225 kg/m³. También es directamente proporcional a la superficie barrida por las palas y al cubo de la velocidad del viento.

Sin embargo, tal y como se ha comentado anteriormente, no se puede aprovechar toda esa energía. De hecho, la energía que realmente es absorbida es la diferencia de energías entre la entrada y la salida de la vena fluida tal y como se muestra en la fig. 10.

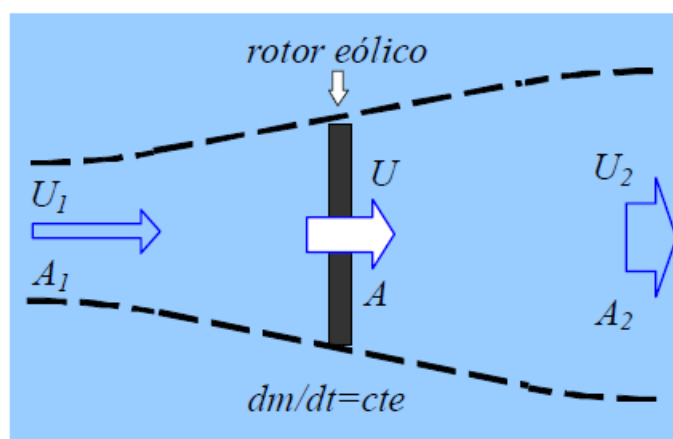


Fig. 10 Representación vena fluida rotor eléctrico. Fuente [15].



Tal y como puede observarse, se cumple el principio de conservación de masa en la vena fluida:  $dm/dt = cte$ . De hecho la sección de la vena fluida a la salida aumenta ( $A_2 > A_1$ ) ya que como el rotor va extrayendo energía del viento, la velocidad del mismo disminuye ( $U_1 > U_2$ ) y además,  $dm/dt = cte$ .

La velocidad del viento decrece linealmente por lo que puede calcularse mediante la media aritmética:

$$U = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

Por tanto, la potencia que realmente es captada por el rotor es la diferencia entre las potencias del aire a la entrada y a la salida.

$$P_c = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (U_1^2 - U_2^2) = \frac{1}{2} \rho A U (U_1^2 - U_2^2) = \frac{1}{2} \rho A \frac{U_1 + U_2}{2} (U_1^2 - U_2^2)$$

La potencia también se puede expresar en función de la velocidad inducida (a):

$$U_2 = U_1(1 - 2a) \Rightarrow P_c = \frac{1}{2} \rho A U_1^3 4a(1 - a)^2$$

Para sacar la máxima potencia que podemos extraer del rotor basta con derivar  $P_c$  respecto de  $a$  e igualando a cero:

$$\frac{dP_c}{da} = 0 \Rightarrow a = 1/3 \Rightarrow P_{c,max} = \frac{1}{2} \rho A U_1^3 \frac{16}{27}$$

Ese  $16/27$  que es igual a  $0.5926$  el cual es el límite de Betz. Este límite nos marca que lo máximo que podemos aprovechar la potencia del viento es el  $59.26\%$ . De hecho, en la práctica el aprovechamiento es menor y, en parte, depende de las palas. Aquí es donde aparece el concepto de coeficiente de potencia que se ha nombrado anteriormente y que es directamente proporcional a la potencia que realmente se aprovecha del viento tal y como se muestra a continuación:

$$P_c = \frac{1}{2} \rho A U^3 C_p$$

Donde:

A: área barrida de las palas.  $A = \pi r^2$ , siendo  $r$  el radio del rotor.

U: velocidad del viento.

$\rho$ : densidad del viento

Por tanto, la potencia máxima que podemos extraer del viento será directamente proporcional al  $C_p$  máximo, que corresponde al valor del límite de Betz. Sin embargo, este valor es teórico ya que en la realidad el  $C_p$  suele estar por debajo de dicho parámetro.

Como se ha dicho anteriormente, la cantidad de energía obtenida no depende solo de las palas sino que también interviene la relación de velocidades en la punta de la pala, denominada  $\lambda$  (velocidad específica). Este parámetro sigue la siguiente expresión:

$$\lambda = \frac{\Omega * R}{U_1}$$

Donde:

$\Omega$ : velocidad de rotación del rotor.

R: radio del rotor.

$U_1$ : velocidad del viento.

Finalmente, una vez explicadas las distintas características del rotor eólico se concluye que la mayor eficacia se obtiene con las turbinas de eje horizontal de dos o tres palas. Además, cuanto menor es el número de palas más planas son las curvas de  $C_p$ . En la fig. 11.

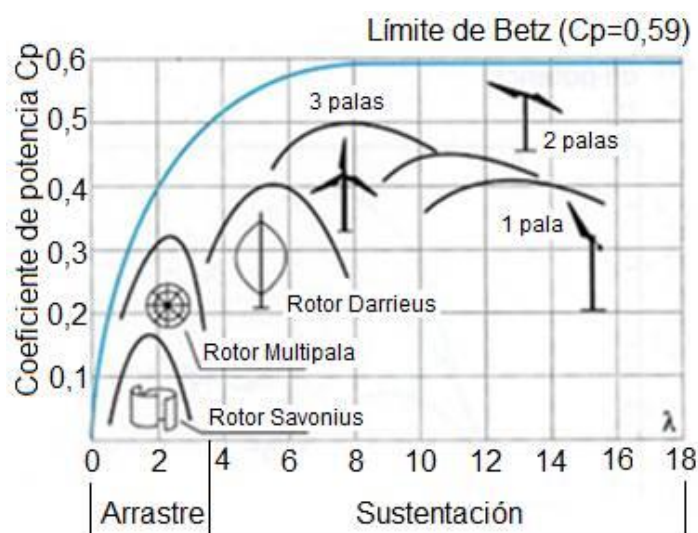


Fig. 11 Curvas del coeficiente de potencia para distintos tipos de aerogeneradores. Fuente [15].

Se suele emplear aerogeneradores de tres palas por su relación de  $C_p$  máximo con respecto al coste.

#### - Buje

Se trata del elemento estructural encargado de unir las palas del aerogenerador. Esta pieza tiene como función principal transmitir el movimiento de las palas al eje de baja velocidad. Además, debe de soportar todo el peso de las palas.

El buje es una pieza cuyo diseño es complejo y su peso elevado, por ejemplo, en una máquina de 2MW, su peso oscila alrededor de los 15000 kilogramos.

El buje es una pieza de fundición recubierta por una capota de fibra de vidrio.

### 3.4.2 Góndola o nacelle

La **góndola**, agrupa los elementos mecánicos, el generador y, a veces, el transformador. Por tanto, la góndola es el elemento estructural donde se encuentra todos los elementos necesarios para la transformación de la energía mecánica recogida del viento en energía eléctrica. Los distintos elementos, así como su ubicación dentro de la misma se puede observar en la fig. 12.

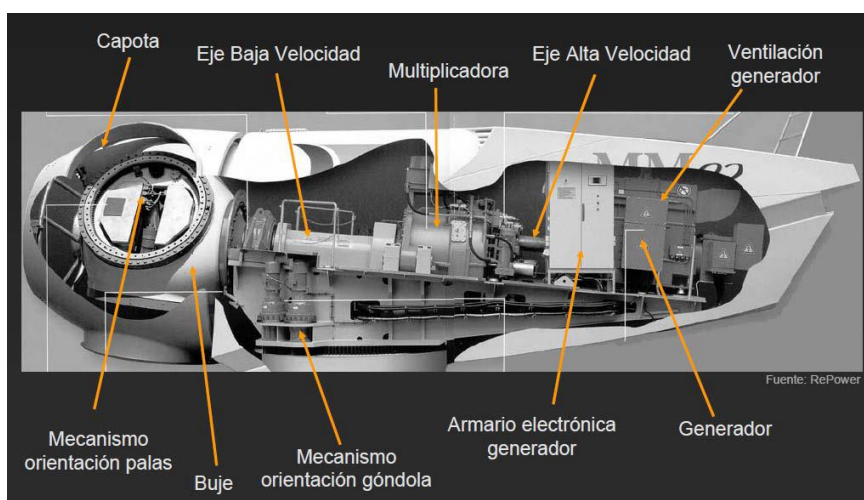


Fig. 12 Componentes ubicados en la góndola. Fuente [15].

### 3.4.3 Torre

La **torre** es otro de los componentes principales que conforman un aerogenerador de eje horizontal. Este elemento es el encargado de proporcionar la altura al rotor. A mayor altura, mayor es la producción de energía, siempre y cuando el perfil vertical del viento sea creciente, pero mayor es también su coste.

Existen distintas configuraciones de la torre como la torre de celosía (estructura metálica), estructura tubular de acero y torre tubular de hormigón. La más empleada

en la actualidad es la torre tubular de acero la cual se construye mediante la unión de varios trozos cilíndricos, tal y como se observa en la fig. 13.



Fig. 13 Montaje de una torre tubular de acero

### 3.5 Estructura de un aerogenerador

La función principal de un aerogenerador es obtener energía eléctrica. Esto es posible gracias a la velocidad cinética que posee el viento que se transforma en energía mecánica gracias a un eje. Esta energía se puede emplear en instalaciones aisladas para aplicaciones de bombeo, o bien, para sistemas de producción de energía eléctrica.

Continuamente la tecnología de aerogeneradores ha ido evolucionando y actualmente el modelo más empleado es una máquina de tres palas, orientadas a barlovento, con torre tubular y sistemas de orientación activos. Este tipo de características y disposiciones son las más populares, aunque internamente existan diferencias significativas como por ejemplo al tipo de generador eléctrico y los sistemas de control del aerogenerador.

De forma esquemática, en la imagen inferior, se muestra los componentes principales que permiten la transformación de dicha energía cinética del viento en energía mecánica y finalmente a energía eléctrica.

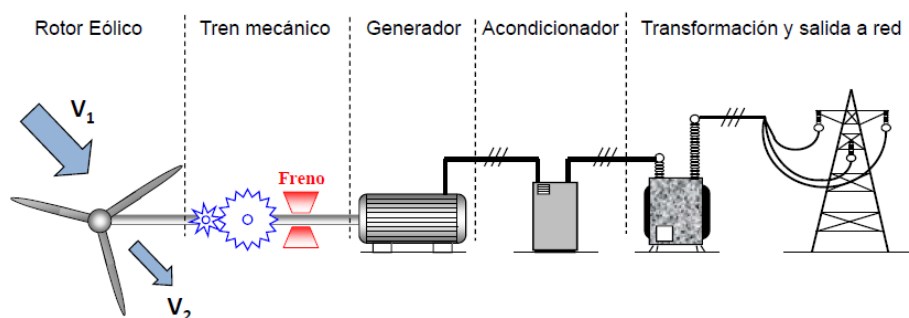


Fig. 14 Esquema de la estructura de un aerogenerador. Fuente [15].

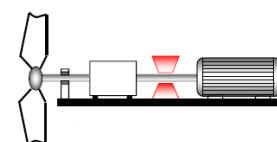
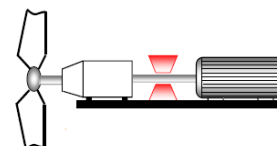
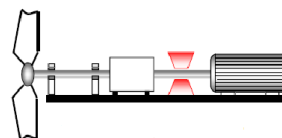
Las palas del aerogenerador se encargan de absorber la energía del viento. Esta energía se transmite por el tren mecánico hasta el generador, el cual es el encargado de transformar la energía en energía eléctrica. Una vez que ya está acondicionada se vierte a la red.

### Tren mecánico

Está compuesto por el eje de baja velocidad, la multiplicadora y el eje de alta velocidad. El conjunto del eje de baja velocidad y la multiplicadora son los elementos que soportan todo el peso del rotor eólico.

Al eje de baja velocidad se le añaden rodamientos con el objetivo de que estos elementos sean los encargados de absorber las cargas que el rotor eólico transmite a la torre. La disposición de estos rodamientos puede variar entre tres alternativas:

- Dos rodamientos incluidos en el eje de baja velocidad. De esta forma la multiplicadora no soporta ninguna carga excepto el par que es transmitido desde el eje de rotación. Sin embargo, tal y como se muestra a la derecha esta configuración resulta larga y pesada.
- Integrar los dos rodamientos en la multiplicadora. De esta forma se reduce la longitud del eje pero la multiplicadora ha de ser mayor.
- Como solución intermedia y bastante empleada actualmente, consiste en colocar un rodamiento delantero a modo de anclaje e integrar otro en la multiplicadora.



### Multiplicadora

Es necesario incluir una multiplicadora entre el rotor (eje de baja velocidad) y el generador (eje de alta velocidad) para poder adaptar estas dos etapas. Por tanto, la multiplicadora es la encargada de adaptar la velocidad del rotor (15-30 rpm) a la del generador eléctrico (1000-1500 rpm). No es un elemento necesario ya que existen algunos aerogeneradores que no la llevan.

Se trata de un elemento muy delicado ya que tiene que absorber los esfuerzos aerodinámicos, es uno de los elementos que más fallan y su mantenimiento es caro.

### 3.6 Comunicaciones y actuadores del aerogenerador

En este apartado se explica las distintas **comunicaciones y los actuadores** del aerogenerador que dan origen a los retrasos que se analizan en este documento.

#### 3.6.1 Comunicaciones en un aerogenerador

La estrategia de control de un aerogenerador está programada en un **PLC** (Programmable Logic Controller), un autómata programable. Un ordenador integrado con **módulos E/S** (I/O), entradas y salidas, conectados en línea y bus de campo (capa de enlace) hacen el sistema de comunicación junto con funciones de software de automatización sirven como un sistema de comunicación central.

Todas las funciones se ejecutan desde una **CPU central** (Unidad Central de Procesamiento) desde la gestión operaciones, control del pitch, visualización y tecnología de seguridad a través de monitorización y diagnóstico, funciones de acceso remoto y redes de parques eólicos.

En la fig. 15 se observan las partes del sistema de control de un aerogenerador. Los diferentes elementos se encuentran en la nacelle o en la base de la torre. El PC embebido es un ordenador donde se programa toda la lógica, es el cerebro de toda la estrategia de control de la máquina. Los módulos de comunicación de entrada y salida son los encargados de por ejemplo hacer que un relé actúe o no.



**Fig. 15 Armario en la nacelle donde se encuentra el PC y los diferentes elementos para el control de la máquina.**  
 Fuente [14].

A continuación se muestra de forma esquemática el proceso de comunicaciones por ejemplo para el control del pitch.



Fig. 16 Esquema 1 comunicaciones para el control del pitch. Fuente [14].

Al PC embebido le llegan todas las medidas recibidas de los diferentes sensores a través de los diferentes módulos. Son estos módulos los que realmente reciben la información de los **sensores** encargados de realizar diferentes mediciones para el correcto funcionamiento del aerogenerador. Estos sensores pueden ser los encargados de medir la velocidad del viento (anemómetro), el ángulo de pitch (codificador rotatorio o encoder), etc.

Este primer bloque está conectado en la propia nacelle a diferentes módulos de comunicación encargados de la gestión operativa. El esquema de conexión se muestra en la fig. 17. Estos módulos de comunicación comunican con diferentes **relés, actuadores...** a los que manda la orden de actuar o no actuar y de qué manera.

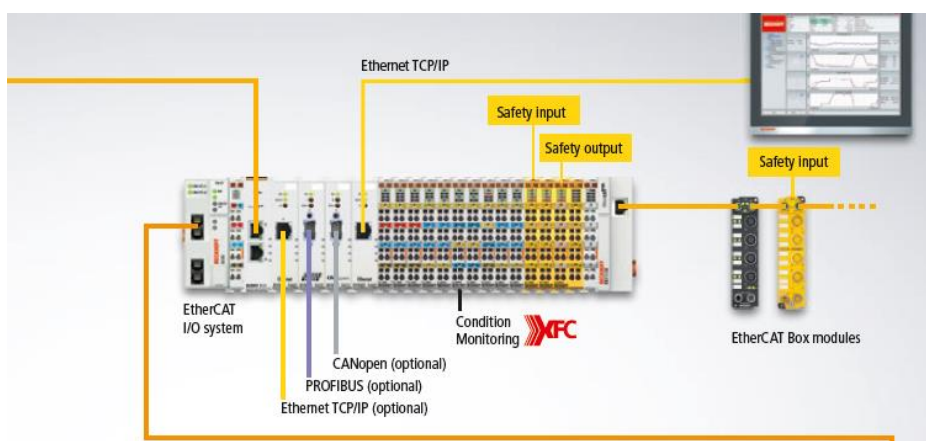


Fig. 17 Esquema 2 comunicaciones para el control del pitch. Fuente [14].

Por último, un PC integrado instalado en la base de la torre recibe y procesa todos los datos, supervisa la alimentación de la red y se comunica con la central de la sala de control. La tecnología de seguridad y medición así como la monitorización se integran en el controlador a través de módulos de E/S apropiados. El convertidor, el sistema de



E/S para la gestión operativa en la góndola y el control del pitch en el buje se conecta al controlador principal a través de bus de campo. En la fig. 18, se puede ver dichas conexiones.

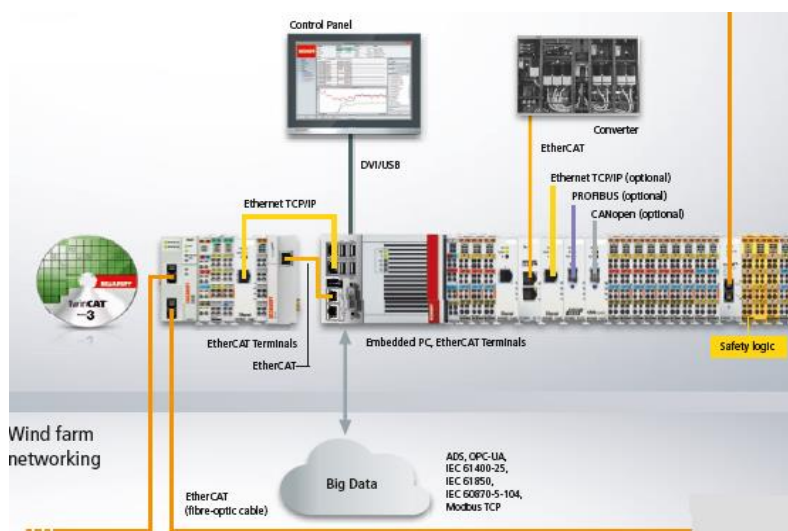


Fig. 18 Esquema 3 comunicaciones para el control del pitch. Fuente [14].

Todos los datos se almacenan para poder analizarlos de manera continua y realizar los cambios oportunos en el control para el correcto funcionamiento de la máquina.

Por tanto, se ha visto que todo el control de la máquina conlleva una serie de conexiones entre diferentes elementos. Debido a este tipo de interconexión en etapas, bien sea en serie o en paralelo, para las diferentes comunicaciones y el transporte de datos se generan retrasos en las comunicaciones.

### 3.6.2 Actuadores del aerogenerador

Resulta fundamental que el actuador modifique el pitch de la manera más efectiva posible, adaptándose a la velocidad necesaria (hasta 7°/s) en funcionamiento normal y velocidades distintas en caso de emergencia. El ángulo de pitch puede variar entre 0 y 35 grados en función del punto de operación para la captación de energía y puede a 90 grados cuando se utiliza como sistema de frenado (palas en bandera). El accionamiento de sistema de giro consta de un actuador, eléctrico o hidráulico, a partir del cual se transmite el movimiento de giro a la pala directamente o a través de un elemento adicional como ruedas dentadas, barra de desplazamiento etc.

- **Hidráulico.** A través de un circuito hidráulico se empuja un sistema mecánico de pistón que hace que la pala gire. El actuador suele estar ubicado en el buje que se conecta a un grupo de presión hidráulico ubicado en la góndola. La explicación más detallada sobre cómo se producen las conexiones entre los diferentes elementos se puede ver en [2].



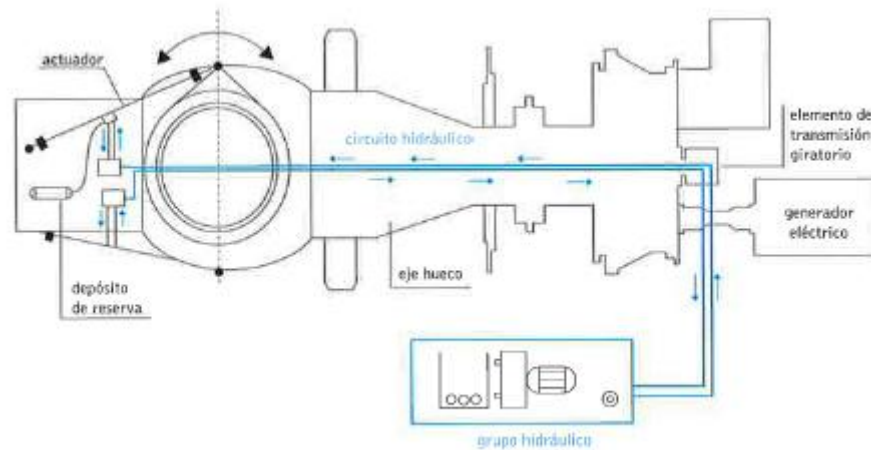


Fig. 19 Actuador hidráulico. Fuente [2].

- **Eléctrico.** Un motor eléctrico gestiona un sistema de piñones a través de un sistema de ejes planetarios en el que el engranaje del motor se suele situar en el interior de la circunferencia de la raíz de la pala.



Fig. 20 Actuador eléctrico. Fuente [2].

Por tanto, debido a la dinámica del funcionamiento del propio actuador como la transmisión del aceite, el movimiento físico de cada elemento, etc., provoca la **aparición de diferentes retrasos** de mayor magnitud que en el caso de las comunicaciones.

Por tanto, en este Trabajo se van a tener en cuenta tanto los **retrasos debidos a las comunicaciones como los debidos a los actuadores** tanto individualmente como en conjunto, dependiendo de la situación concreta a analizar.

## 4. MODELADO DEL AEROGENERADOR

Para la realización de este Trabajo ha sido necesario aprender a utilizar la herramienta de simulación de código aeoroelástico **FAST**. Además de cómo funciona, resulta fundamental entender cómo se introducen todos los datos necesarios del aerogenerador y del viento en la herramienta y de cómo se produce la comunicación entre FAST y el controlador desarrollado por Asier Díaz de Corcuera.

### 4.1 Funcionamiento de la herramienta FAST

La herramienta FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures and Turbulence) es gratuita de tipo CAE (Computer-Aided Engineering) y desarrollada por el instituto NREL (National Renewable Energy Laboratory) de Colorado (USA). El código FAST permite modelar la respuesta dinámica de aerogeneradores convencionales tanto bipala como tripala de eje horizontal, bajo unas condiciones de trabajo predeterminadas. Además, también ofrece la posibilidad de obtener todo tipo de cargas en cada elemento del aerogenerador.

El hecho de que el proyecto se haya desarrollado con FAST y no con otras herramientas existentes como BLADED, es porque se trata de un proyecto universitario público cuyo objetivo es que se vayan haciendo nuevos proyectos que mejoren el modelo existente. Además, FAST es un software gratuito el cual favorece que cualquier persona pueda acceder al modelo sin necesidad de tener una licencia.

Para poder llevar a cabo las distintas simulaciones, FAST une modelos de aerodinámica, hidrodinámico, de control y servo-elásticas. De esta manera permite obtener las simulaciones aero-hidro-servo-elástica acoplada no lineal en el dominio del tiempo.

El entendimiento entre los distintos bloques se logra a través de una interfaz y un acoplador, cuya programación está realizada en lenguaje FORTRAN, el cual es un tipo de lenguaje de programación. Además, la herramienta permite realizar linealizaciones del sistema lo cual se explica en el apartado 4.3.

El aprendizaje del funcionamiento de la herramienta se ha llevado a cabo con la ayuda de [8]-[13].

Como se observa en la fig. 21, se distingue un gran bloque, llamado FAST, en el que hay varias entradas y una sola salida. Este bloque representa la herramienta FAST. Para que esta herramienta funcione adecuadamente, son necesarios diferentes archivos de entrada, para generar un archivo de salida, tal y como se observa.

El conjunto de archivos de texto de entrada, contienen la información de todo el aerogenerador que se va a simular, como la geometría de la pala, altura del buje, diámetro del rotor, si es de paso fijo o variable, número de palas, etc. Además,

también contienen el tiempo de simulación y las salidas o valores que se desean calcular para su posterior evaluación.

El archivo de texto de salida que se genera en la simulación, contiene la información de las distintas variables deseadas a obtener. Cada una de estas variables tiene que estar especificada en uno de los archivos de entrada.

Una vez que se han obtenido los distintos parámetros de salida, es necesario evaluarlos constantemente. Esto se consigue gracias al controlador. Tal y como se va a explicar en el Capítulo 5, las salidas relevantes para llevar a cabo el control son la velocidad del generador y la aceleración de la torre. El controlador puede modificar tres elementos para conseguir dicho efecto:

- Pitch
- Par

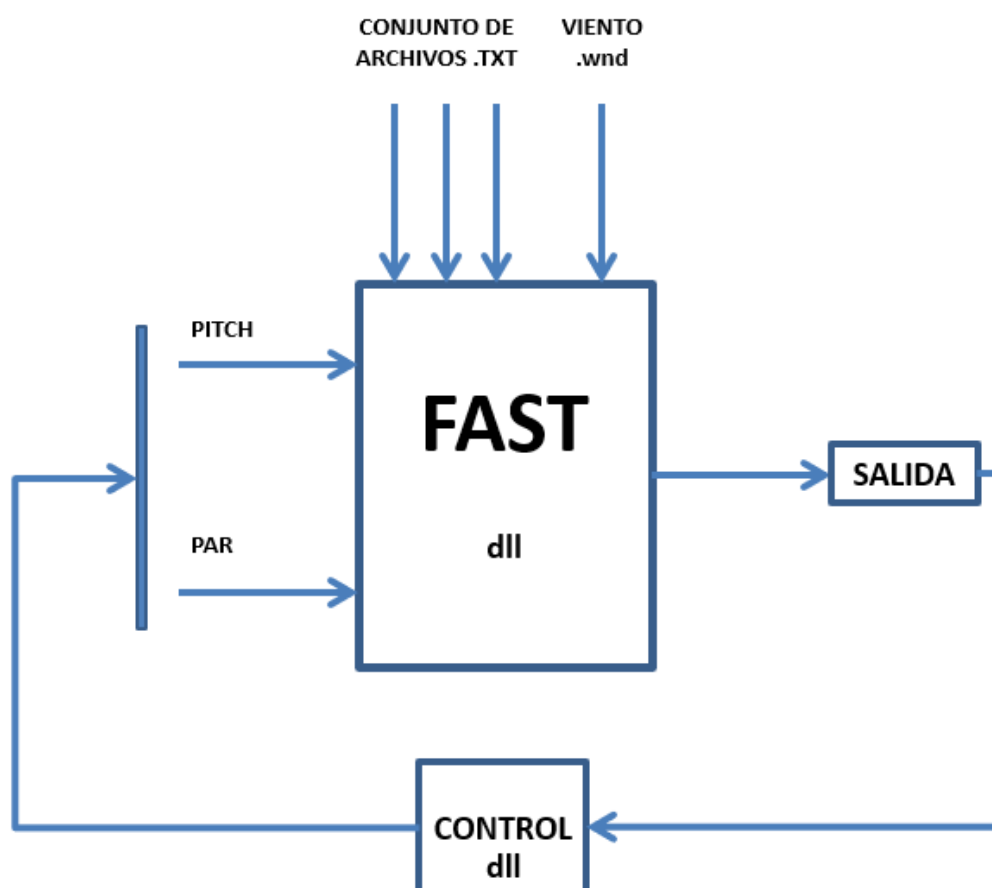


Fig. 21 Esquema de la herramienta FAST

Este proyecto se ha realizado empleando un aerogenerador de 5 MW Onshore, tripala situado a barlovento. Se van a emplear distintas configuraciones de viento según la

norma IEC 61400-1 y el código aerolástico de FAST. El resto de características del aerogenerador están explicadas en el apartado 3.5.

## 4.2 Modelo aerogenerador de referencia

Tal y como se ha comentado anteriormente, se parte del modelo de aerogenerador utilizado por Asier Díaz de Corcuera en [3]. En este apartado se describen las características de cada uno de los componentes, así como datos relevantes a tener en cuenta del aerogenerador para la evaluación de los resultados obtenidos.

### 4.2.1 Características de los componentes del modelo de referencia

A continuación, se muestra las características del aerogenerador que se ha empleado para las distintas simulaciones.

**Tabla 2 Propiedades generales del aerogenerador**

| Propiedades generales                             |                                      |
|---|--------------------------------------|
| Potencia nomina (MW)                              | 5                                    |
| Configuración                                     | Barlovento, tripala                  |
| Control   | Velocidad variable y pitch colectivo |
| Díámetro rotor (m)                                | 126                                  |
| Inclinación de la pala (°)                        | 2.5                                  |
| Distancia horizontal entre el buje y la torre (m) | 5                                    |
| Velocidad de viento de arranque (m/s)             | 3                                    |
| Velocidad de viento nominal (m/s)                 | 11.4                                 |
| Velocidad de viento de parada (m/s)               | 25                                   |
| Velocidad de rotor de arranque (rpm)              | 6.9                                  |
| Velocidad de rotor nominal (rpm)                  | 12.1                                 |
| Velocidad de punta de pala nominal (m/s)          | 80                                   |
| Masa del rotor (kg)                               | 110000                               |
| Centro de mas del aerogenerador (m en xyz)        | -0.2; 0; 64                          |

**Tabla 3 Propiedades de las palas del aerogenerador**

| Propiedades de las palas                              |            |
|---|------------|
| Longitud (m)  | 61,5       |
| Masa (kg)   | 17 740     |
| Momento de inercia ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )     | 11 776 047 |
| Localización del centro de masas<br>(m desde la base) | 20,475     |
| Ratio de amortiguamiento<br>estructural (%)           | 0,477465   |

**Tabla 4 Propiedades del buje y de la góndola del aerogenerador**

| Propiedades del buje y de la góndola  |               |
|---|---------------|
| Elevación del rodamiento del yaw sobre el<br>suelo (m)  | 87.6          |
| Distancia vertical a lo largo del eje de yaw<br>desde el rodamiento hasta el eje de<br>transmisión (m)                                  | 1.96256       |
| Distancia a lo largo del eje de transmisión<br>desde el centro del buje hasta el eje del<br>yaw (m)                                     | 5.0191        |
| Distancia a lo largo del eje de transmisión<br>desde el centro del buje hasta el<br>rodamiento principal (m)                            | 1.912         |
| Diámetro del buje (m)   | 3             |
| Altura buje (m)   | 90            |
| Masa del buje (kg)  | 56 780        |
| Momento de inercia del buje ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )  | 115 926       |
| Masa de la góndola (kg)   | 240 000       |
| Coordenada horizontal de la localización del<br>centro de masas de la góndola (m desde el<br>eje de yaw aguas abajo)                    | 1.9           |
| Coordenada vertical de la localización del<br>centro de masas de la góndola (m desde el<br>eje de yaw aguas hacia arriba)               | 1.75          |
| Momento de inercia de la góndola ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )   | 2 607 890     |
| Frecuencia natural del actuador del yaw<br>(Hz)   | 3             |
| “Linear-spring constant” (cte. de resorte<br>lineal) del actuador del yaw ( $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ )                        | 9 028 320 000 |
| “Linear-damping constant” (cte. de<br>amortiguamiento lineal) del actuador del<br>yaw ( $\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})$ ) | 19 160 000    |
| Velocidad angular del yaw ( $^\circ/\text{s}$ )   | 0.3           |

Tabla 5 Propiedades del tren de potencia y del generador eléctrico del aerogenerador

| Propiedades del tren de potencia y generador eléctrico  |             |
|---|-------------|
| Velocidad nominal del generador (rpm)   | 1173,7      |
| Ratio de multiplicación   | 97:1        |
| Eficiencia del generador (%)  | 94,4        |
| Momento de inercia del generador (kg·m <sup>2</sup> )   | 534,116     |
| “Torsional-spring constant” (par de torsión) del eje de transmisión (N·m/rad)                         | 867 617 000 |
| “Torsional-damping constant” (cte. de amortiguamiento torsional) del eje de transmisión (N·m/(rad/s)) | 6 215 000   |
| Par del freno en el eje de alta velocidad a pleno rendimiento (N·m)                                   | 28 116,2    |
| Constante de tiempo del freno en el eje de alta velocidad (s)   | 0,6         |

Tabla 6 Propiedades de la torre del aerogenerador

| Propiedades de la torre                          |         |
|--|---------|
| Diámetro en la base (m)                          | 6       |
| Grosor en la base (m)                            | 0.027   |
| Diámetro en la punta (m)                         | 3.87    |
| Grosor en la punta (m)                           | 0,019   |
| Módulo de Young (GPa)                            | 210     |
| Módulo de cizalladura (GPa)                      | 80.8    |
| Densidad efectiva del acero (kg/m <sup>3</sup> ) | 8 500   |
| Masa de la torre (kg)                            | 347 460 |
| Altura (m)                                       | 87.6    |
| Centro de masas (m sobre el suelo)               | 38.234  |
| Ratio de amortiguamiento estructural (%)         | 1       |

**Tabla 7 Propiedades del control del aerogenerador**

| Control   |             |
|---|-------------|
| Constante de par del generador en la región 2 ( $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rpm}^2$ )  | 0.0255764   |
| Potencia mecánica nominal (MW)  | 5.29661     |
| Par del generador nominal ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )   | 43 093.55   |
| Par del generador máximo ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )  | 47 402.91   |
| Máximo índice de par del generador ( $\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}$ )   | 15 000      |
| Ganancia proporcional a pitch nulo (s)  | 0.01852681  |
| Ganancia integral a pitch nulo  | 0.008068634 |
| Máximo índice de ángulo de pitch ( $^\circ/\text{s}$ )  | 8           |
| “Linear-spring constant” (par de torsión) del actuador del pitch ( $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ )                             | 971 350 000 |
| “Linear-damping constant” (cte. de amortiguamiento lineal) del actuador del pitch ( $\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad}/\text{s})$ ) | 206 000     |

Todos estos parámetros están introducidos en distintos archivos de texto para que FAST los lea. Otro de los archivos de entrada también contiene toda la estructura de la pala tal y como se muestra en la fig. 22. Los datos referentes al control están en la librería dll.



Tenemos 17 nodos incluidos en 8 perfiles aerodinámicos. Con colores se indican en qué perfil aerodinámico está incluido cada nodo.

El significado de cada uno de los datos de la figura anterior, están explicados en [13]. De la misma forma que la estructura de la pala, en otros archivos de texto, podemos encontrar las características de la torre.



## 4.2.2 Sistemas de coordenadas del aerogenerador en FAST

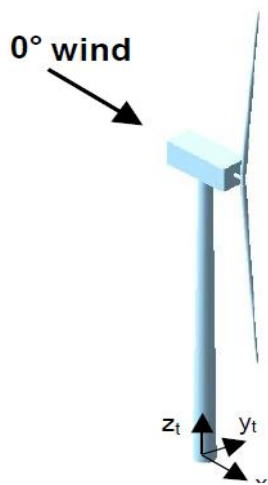


Fig. 24 Sistema de coordenadas de la base de la torre. Fuente [13]

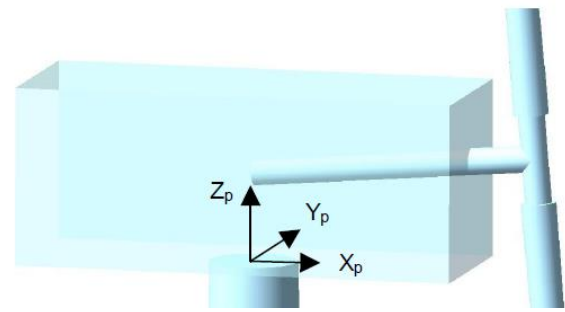


Fig. 23 Sistema de coordenadas de la parte superior de la torre. Fuente [13]

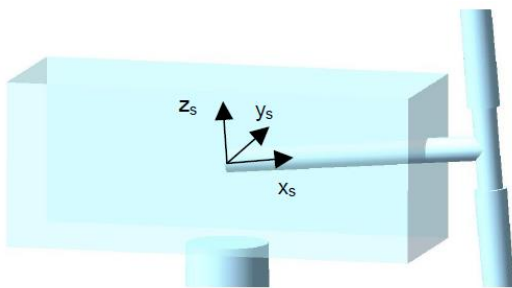


Fig. 26 Sistema de coordenadas del tren de potencia. Fuente [13]

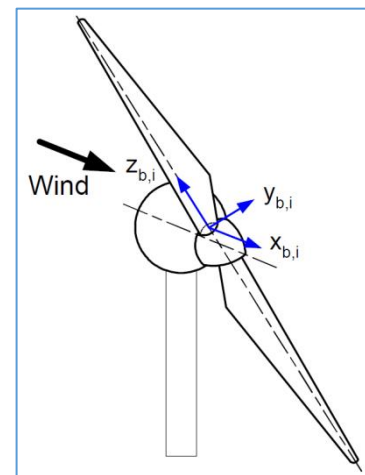


Fig. 25 Sistema de coordenadas de las palas. Fuente [13]

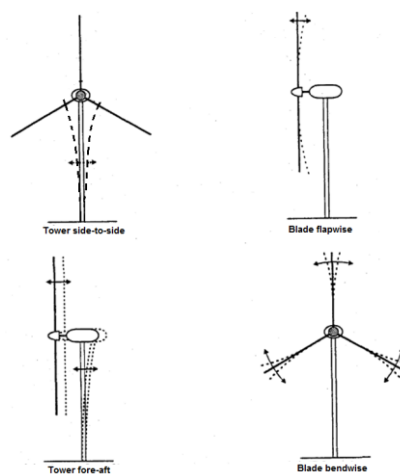


Fig. 27 Algunos grados de libertad de los aerogeneradores. Fuente [3]

#### 4.2.3 Modo de vibración de los distintos componentes

El análisis del modo de vibración resulta imprescindible a la hora de diseñar cualquier estrategia de control. Este análisis consiste en estudiar los modos de frecuencia de los diferentes componentes del aerogenerador.

Los datos de las **frecuencias naturales** se recogen en [3] y quedan reflejados en la Tabla 8:

Tabla 8 Frecuencias naturales del aerogenerador. Fuente [3].

| ELEMENTO         | MODO                             | FRECUENCIA [Hz] |
|------------------|----------------------------------|-----------------|
| Rotor            | En plano 1º simétrica            | 3.68-3.69       |
|                  | En plano 1º FW                   | 1.31-1.29       |
|                  | En plano 1º BW                   | 0.89-0.88       |
|                  | En plano 2º simétrica            | 7.85-7.36       |
|                  | En plano 2º FW                   | 4.30-4.31       |
|                  | En plano 2º BW                   | 3.88-3.87       |
|                  | Fuera de plano 1º FW             | 0.93            |
|                  | Fuera de plano 1º simétrica      | 0.73            |
|                  | Fuera de plano 1º BW             | 0.52-0.53       |
|                  | Fuera de plano 2º FW             | 2.20-2.21       |
|                  | Fuera de plano 2º simétrica      | 2.00-2.01       |
|                  | Fuera de plano 2º BW             | 1.80 – 1.81     |
| Tren de potencia | Tren de potencia                 | 1.66-1.63       |
| Torre            | 1º modo side to side de la torre | 0.28            |
|                  | 1º modo fore-aft de la torre     | 0.28            |
|                  | 2º modo side to side de la torre | 2.85-2.87       |
|                  | 2º modo fore-aft de la torre     | 3.05-3.04       |
| No estructural   | 1P                               | 0.2             |
|                  | 3P                               | 0.6             |

Las frecuencias naturales 1P y 3P representan la frecuencia por la que pasan por la torre. Resulta fundamental conocer dichas frecuencias ya que en ese momento se producen vibraciones por el “efecto sombra” Esquema 1 comunicaciones para el control del pitch. Fuente [14]. de la torre. Es decir, la torre impide el paso del viento provocando perturbaciones diferentes en ese punto con respecto a cualquier otro punto.

### 4.3 Modelo linealizado

Además de poder llevar a cabo simulaciones, FAST, también permite obtener representaciones lineales del modelo aerolástico no lineal del aerogenerador. El proceso de linealizar es muy importante para el diseño de las estrategias de control en aerogeneradores.

Las linealizaciones se consiguen encontrando un punto de funcionamiento y trabajando en un entorno próximo a él. Cada modelo lineal se obtiene en función de la posición de las palas, es decir, del azimuth. El ángulo azimuth es el ángulo formado entre la posición de la pala respecto de la vertical.

Cuando trabajamos con FAST en **modo linealización**, el viento de entrada ha de ser constante en un punto de operación determinado. En este proyecto los puntos de operación que se han escogido son a 7, 11, 13, 19 y 25 m/s. Estos valores son las velocidades de viento a la que se va a linealizar para llevar a cabo el análisis del comportamiento del sistema.

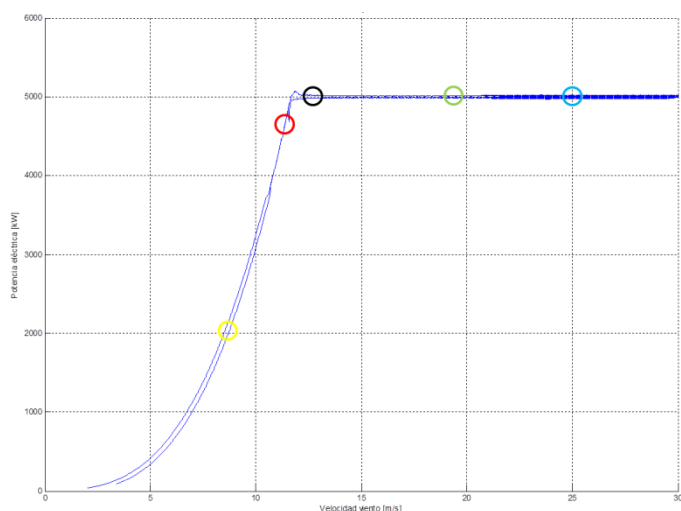


Fig. 29 Curva de potencia

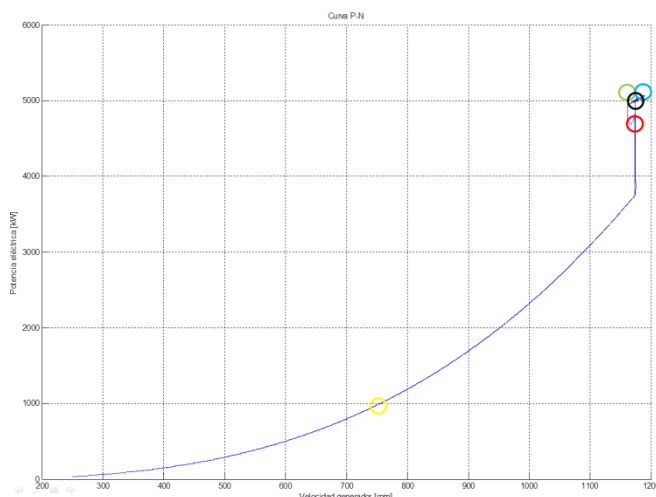


Fig. 28 Curva P-N

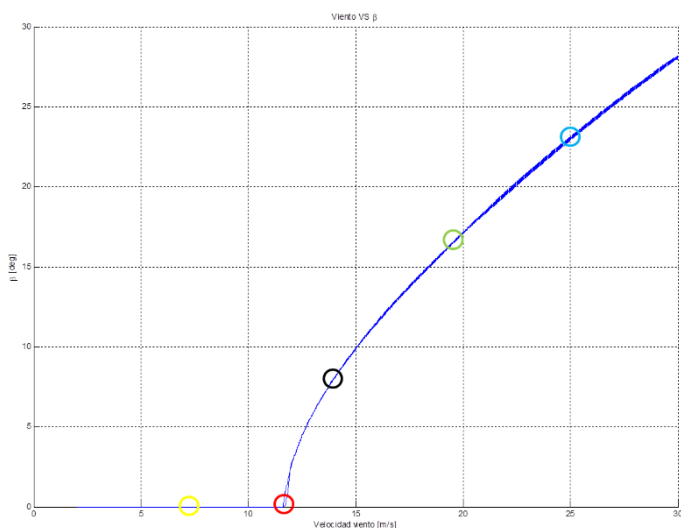


Fig. 30 Velocidad de viento vs pitch

**Puntos de operación:**

● 7ms ● 11ms ● 13ms ● 19ms ● 25ms

Los modelos que se extraen de FAST son un sistema de funcionamiento lineal para el azimuth que se haya marcado. Estos sistemas están formados por matrices de estados. La relación existente entre las entradas y las salidas sigue las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + Bu(t) + B_d w(t) \\ y(t) &= CX(t) + Du(t) + D_d w(t) \end{aligned}$$

El vector  $u(t)$  recoge los valores de entrada demandados de pitch y par. Cabe destacar que, en este caso, estamos trabajando con un pitch colectivo, mismo pitch para las tres palas, por lo que hay una única entrada de pitch. En el caso de que el pitch no fuera colectivo, tendríamos tres ángulos distintos, uno para cada una de las palas. Por tanto, el vector  $u(t)$  queda de la siguiente forma:

$$u(t) = \begin{pmatrix} \beta \\ T \end{pmatrix}$$

El vector de estados viene dado por  $X(t)$  cuya dimensión depende del número de modos implementados en el modelo no lineal de la turbina. Las matrices  $A$ ,  $B$ ,  $B_d$ ,  $C$ ,  $D$  y  $D_d$ , representan el sistema de la turbina. Las matrices  $B_d$  y  $D_d$ , contienen las perturbaciones debidas al viento. Se tienen en cuenta estas últimas a parte por la forma que tiene FAST de realizar las linealizaciones. A continuación, se muestra un esquema de cómo FAST linealiza por un lado toda la planta y, por otro, el viento:

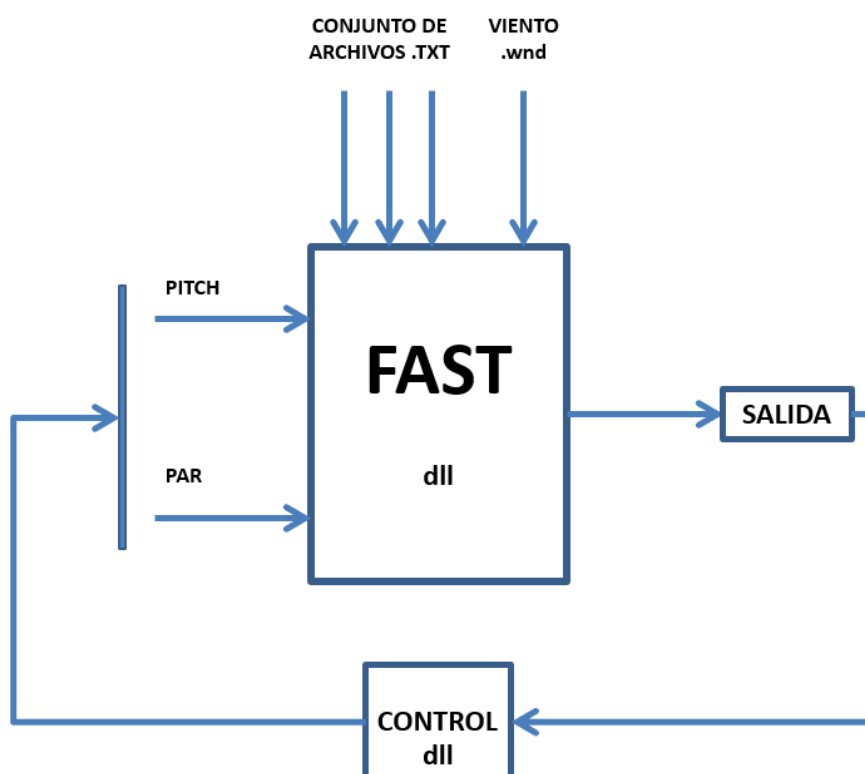
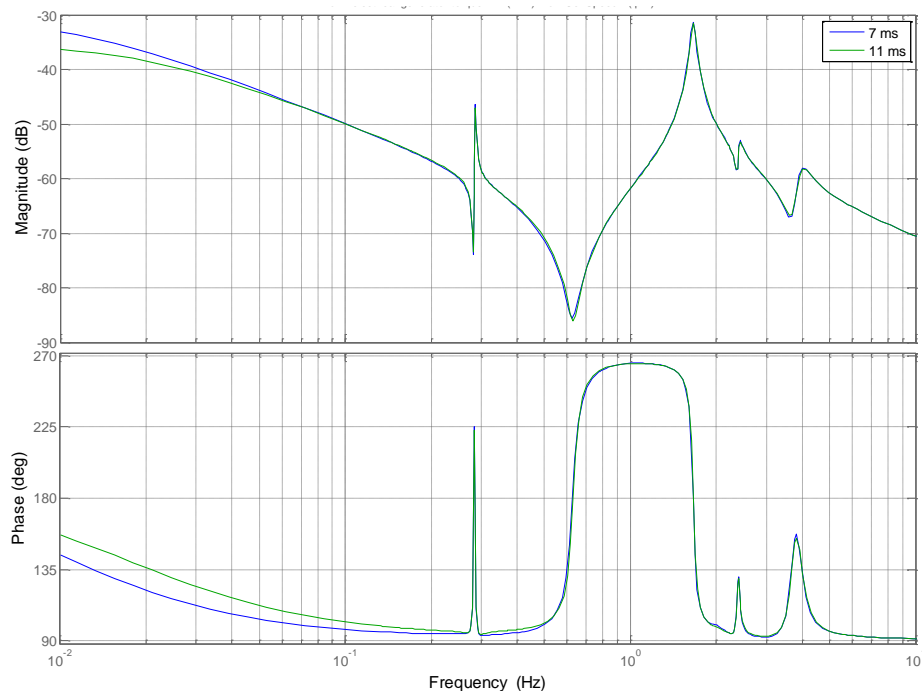


Fig. 31 Esquema de linealizar de FAST

A continuación, se muestra los resultados obtenidos para los distintos puntos de operación:

### Punto de operación a 7 y 11 m/s



**Fig. 32 Bode par - velocidad generador a los puntos de operación**

Se muestra el bode de **par - velocidad** del generador por estar en el punto de operación de 7 y 11 m/s, donde el control se encuentra modificando el par a partir de la lectura de la velocidad del generador.

### Punto de operación a 13, 19 y 25 m/s

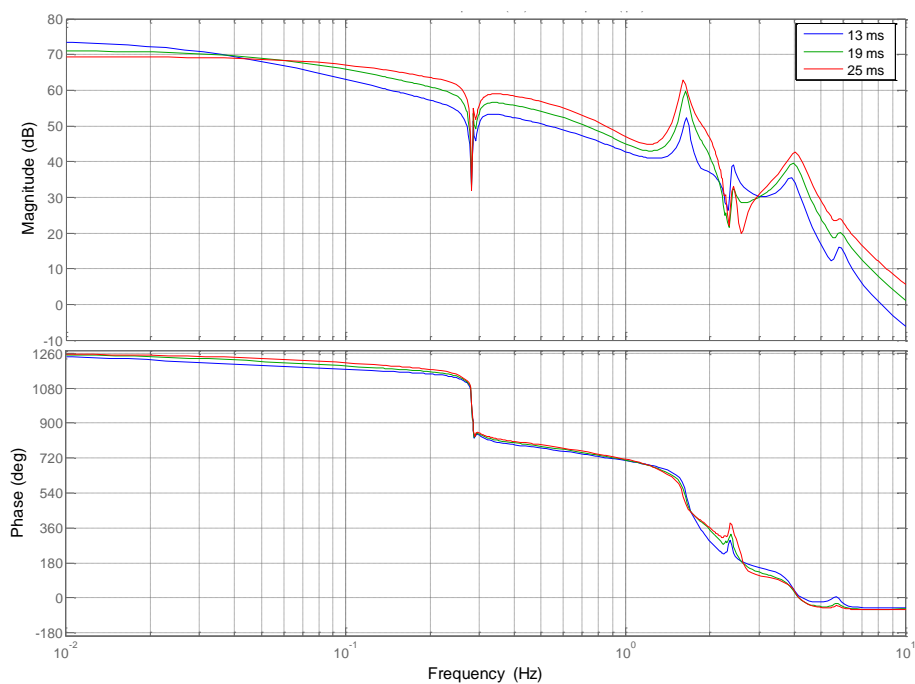


Fig. 33 Bode pitch – velocidad del generador a los puntos de operación

En este caso, se muestra el bode de la fig.33 porque estamos en unos puntos de operación donde el control se realiza variando el ángulo de **pitch** a partir de la lectura de la **velocidad del generador**.

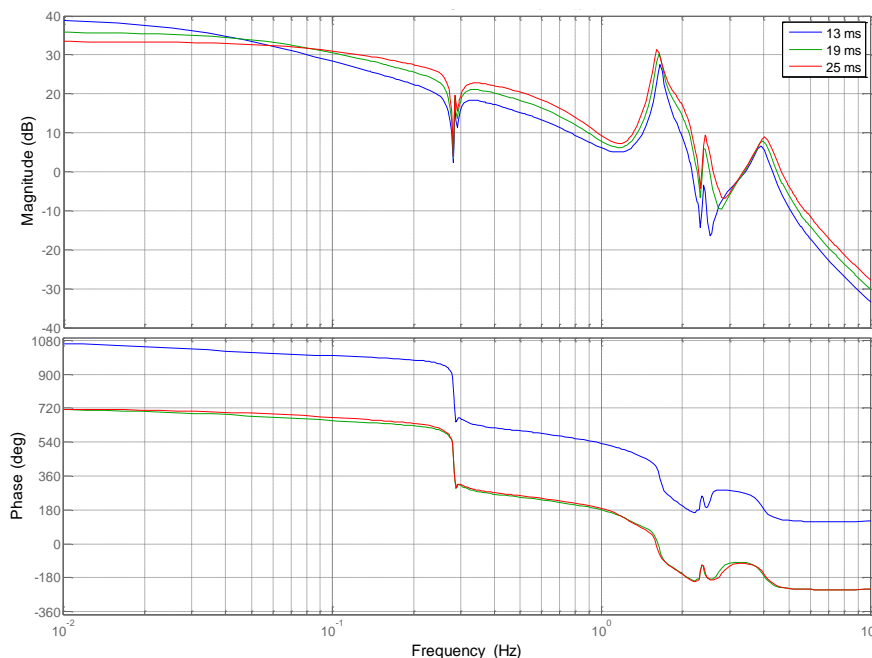


Fig. 34 Bode velocidad viento - velocidad generador a los puntos de operación

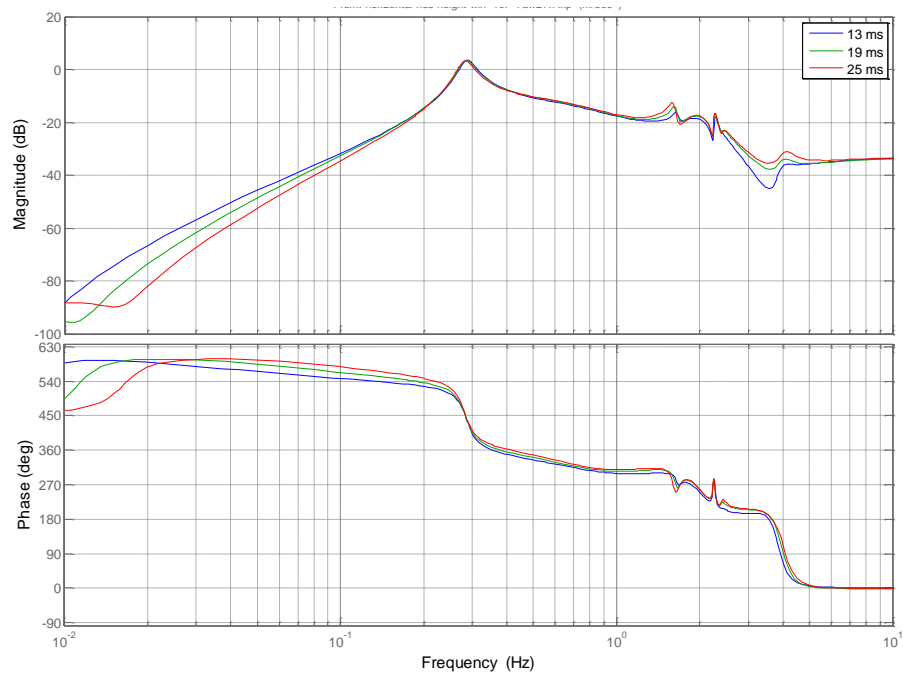


Fig. 35 Bode velocidad viento – aceleración torre a los puntos de operación

El bode representado en la fig. 35 se realiza para la **estrategia de amortiguación de la torre del controlador**.

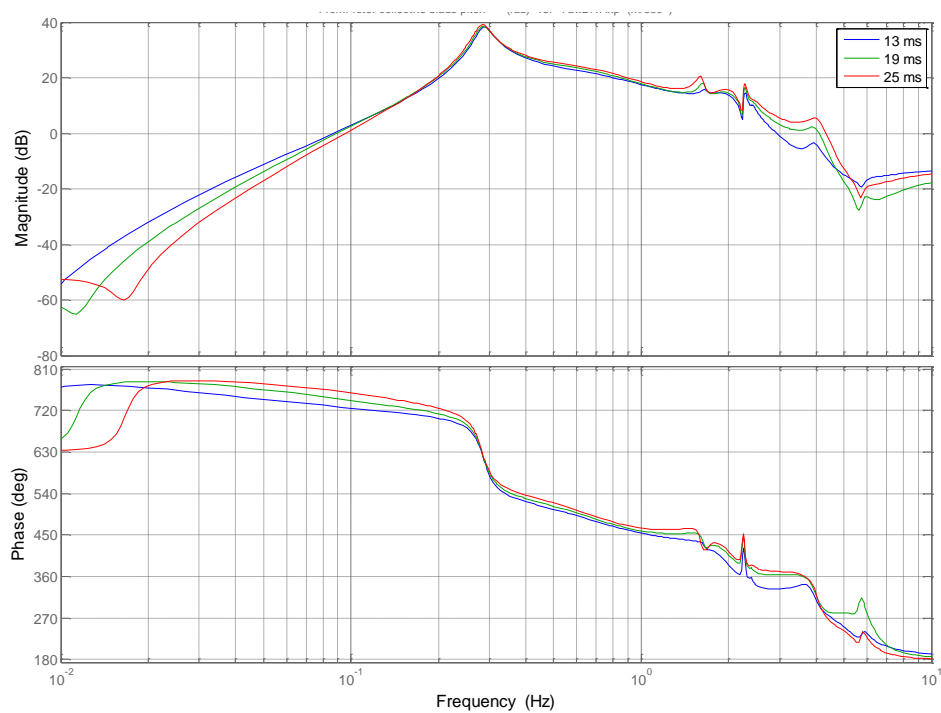


Fig. 36 Bode pitch – aceleración torre a los puntos de operación

El bode representado en la fig. 36 se realiza para la estrategia de amortiguación de la torre del controlador.

## 5. CONTROL DEL AEROGENERADOR

Para poder realizar una estrategia de control, resulta fundamental la comprensión de todos los elementos y saber de manera detallada en qué momento actúa cada uno de ellos para un correcto funcionamiento del aerogenerador. En ese apartado, se analiza por un lado la parte teórica común del control de cualquier aerogenerador, para a continuación, analizar la estrategia que utiliza de referencia en [3] y evaluar su comportamiento.

### 5.1 Introducción al control de un aerogenerador

Controlar la velocidad a la que funciona el aerogenerador es fundamental para evitar cargas excesivas, y por tanto, alargar su vida útil. Para ello, se va a explicar el funcionamiento del mismo mediante la **curva de potencia y mediante la curva P-N** (Potencia- Velocidad del generador).

#### 5.1.1 Curva de potencia

En este capítulo se va a explicar el funcionamiento aerodinámico de las máquinas de paso variable, por tratarse del tipo de máquina que se utiliza para este proyecto. Además, en la actualidad la mayoría de aerogeneradores que se instalan son de paso variable. Las máquinas de paso variable son aquellas en las que se tiene control del pitch.

En este tipo de máquinas, se controla la potencia extraída del viento mediante el giro de las palas sobre su propio eje. Este tipo de técnica tiene un mayor rendimiento que el que se consigue con pérdida aerodinámica. Sin embargo, el coste de la máquina es superior.

Gracias a este control se logra limitar la potencia a su valor nominal aumentando el ángulo de paso de las palas. Esto se hace cuando la velocidad del viento es superior a la nominal.

A continuación, en la fig. 37 se representa la curva de potencia típica de un aerogenerador con paso variable:



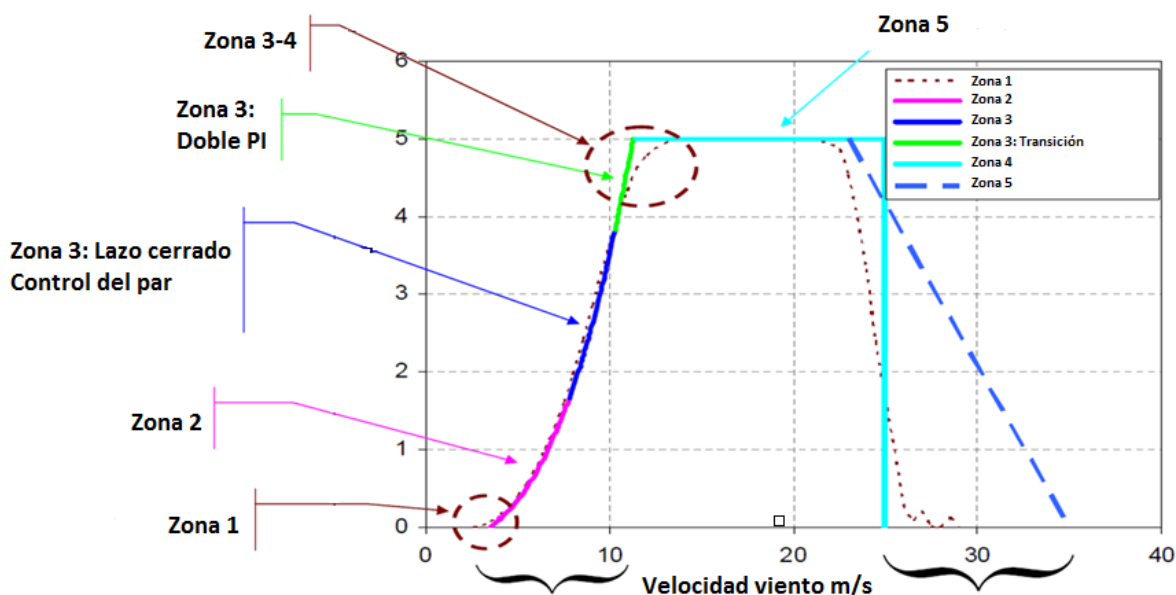


Fig. 37 Curva de potencia

Tal y como puede observarse, la curva de potencia queda dividida en distintas zonas en función del punto de operación en el que nos encontremos. Este punto de operación viene determinado por la velocidad del viento. Lógicamente conforme aumenta la velocidad del viento se obtiene una mayor potencia eléctrica.

La velocidad nominal de viento, es decir, la velocidad a partir de la cual se comienza a trabajar con la potencia nominal suele oscilar entre los 11 y 13 m/s. Una vez llegados a este punto, lo que se quiere es mantener la potencia eléctrica obtenida a la potencia nominal, a pesar de que la velocidad del viento siga aumentando. Una vez que la velocidad del viento supera los 25 m/s aproximadamente, se procede a la parada de la máquina ya que habría que sobredimensionar la máquina y es muy caro para las pocas horas de operación que hay a velocidades superiores de 25m/s.

Según en qué zona nos encontremos, controlaremos la velocidad de giro del generador de dos formas:

- Aumentar o disminuir el **par**, en función de si se desea aumentar o disminuir la velocidad, respectivamente.
- Variar el ángulo de **pitch**, enfrentando una mayor superficie de la pala en la dirección del viento o apartándola, si se desea aumentar o disminuir la velocidad, respectivamente.

### 5.1.2 Curva P-N

En general, los generadores se diseñan para funcionar a plena carga a velocidades de viento de 14m/s aproximadamente. Por tanto, el seguimiento del punto de máxima potencia solo puede llevarse a cabo hasta la velocidad máxima de la turbina y a partir de ahí, la velocidad se tiene que mantener constante y consecuentemente la potencia también (potencia nominal). En la fig. 38 se muestra el funcionamiento del aerogenerador con las diferentes restricciones.

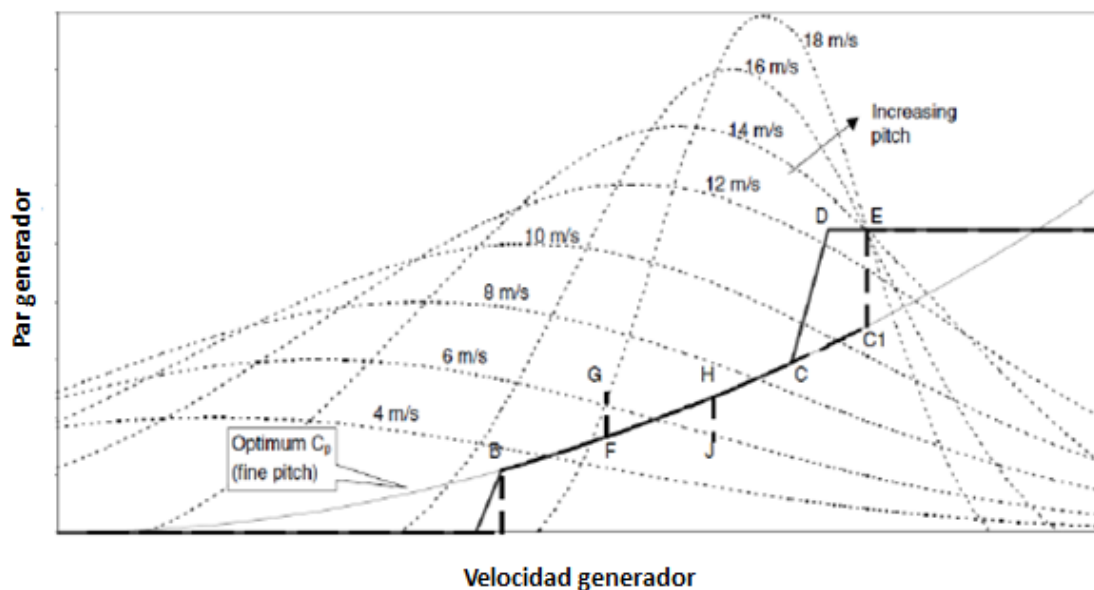


Fig. 38 Curva P-N. Fuente [3]

Existen diferentes zonas de funcionamiento tal y como se ha visto en la fig.37. Para cada una de esas zonas, se distinguen distintas formas de controlar la velocidad de la turbina en función de si estamos por debajo o por encima de la velocidad nominal. En consecuencia, es necesario que el sistema de control tenga dos lazos: lazo de par y lazo de pitch.

Cabe destacar que en la zona 2, no se controla con ningún lazo sino que la potencia de referencia demandada varía en función de la curva de velocidad cuadrática de par la cual maximiza el coeficiente de potencia  $C_p$ .

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V^3 = T \Omega_{rotor}$$

$$\lambda_{opt} = \frac{\Omega_{generator} R}{V i_g}$$

$$T_g = \frac{P}{\Omega_{generator}} = \frac{\eta \pi \rho C_{PMAX} R^5}{2 \lambda_{OPT}^3 i_g^3}$$

Donde:

$V$ : velocidad del viento [m/s]

$lg$ : ratio de transmisión de la multiplicadora [-]

$C_p$ : coeficiente de potencia [-]

$P$ : densidad del aire [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$R$ : radio del rotor [m]

El  **$C_p$  máximo**, depende tanto de  $\lambda$  como del ángulo de pitch que tengamos. Dichas relaciones quedan reflejas en las curvas de  $C_p$  respecto de  $\lambda$ , en función del pitch, de la fig. 39.

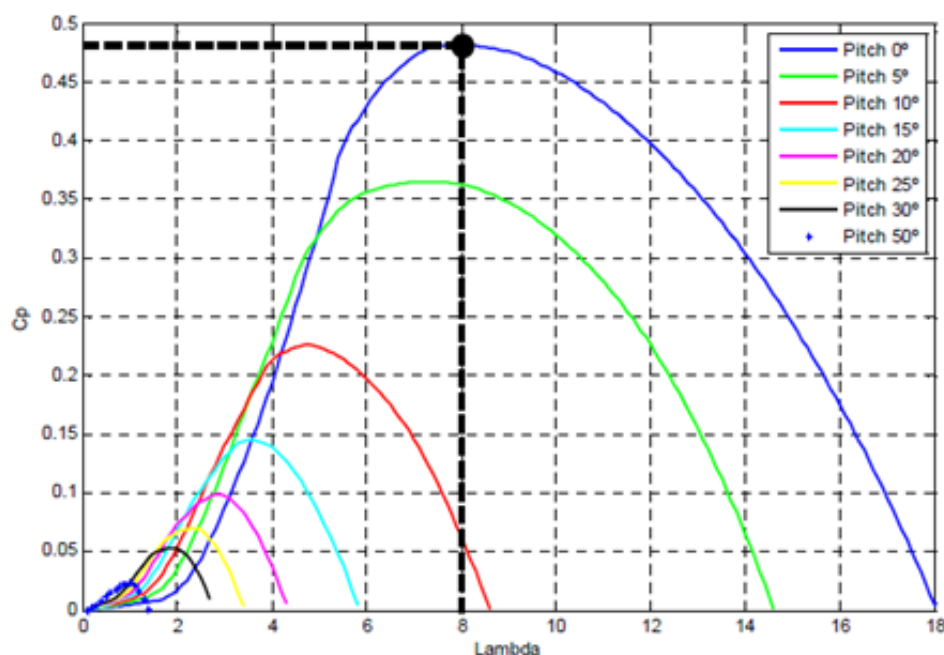


Fig. 39 Curvas  $C_p$  en función de  $\lambda$  y del ángulo de pitch

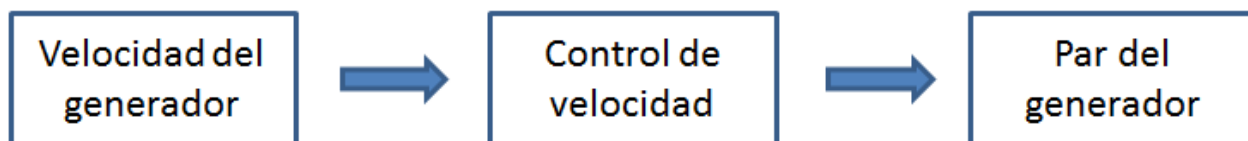
A continuación, se explica tanto el lazo de control de par como el de pitch y, en qué zonas actúa cada uno de ellos.

### 5.1.1 Lazo de control de par

El lazo de control de par, se encarga de determinar las referencias de potencia activa en el estator del generador. Entra en funcionamiento para velocidades **por debajo de la nominal**. Es decir, trabaja en las zonas 1 y 3. El objetivo cuando estamos trabajando en estas zonas es optimizar la energía que se captura del viento.

A partir de la velocidad del generador de salida, se compara con una velocidad del generador de referencia creando un error. Ese error es filtrado para eliminar el ruido.

Esta señal ya filtrada es la que marca al control de par, la cantidad de par demandado para mantener al generador trabajando.



El lazo de par consiste en unos **filtros de par y un PI** (proporcional-integrador). Los filtros tienen de entrada la señal de error en la velocidad del generador. El PI tiene de entrada el error de velocidad de generador respecto a la referencia ya filtrado y como salida el par demandado. A continuación, la señal del error es filtrada para eliminar el ruido. Ese valor de par, es mandado a la planta para que actúe o bien aumentando el par o disminuyéndolo, en función si se quiere disminuir o aumentar la velocidad del generador, respectivamente.

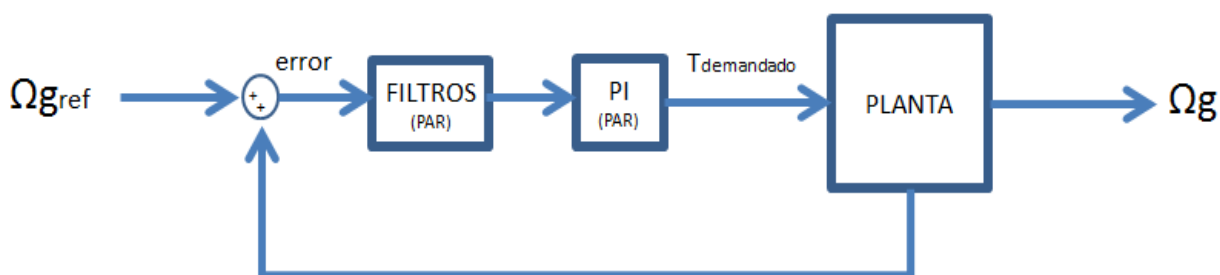
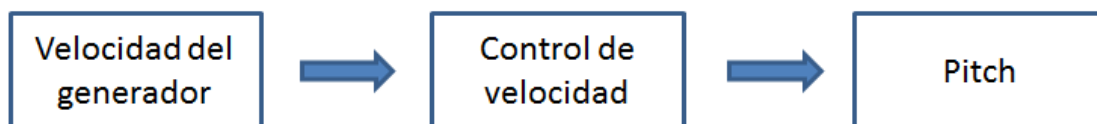


Fig. 40 Esquema lazo de control de par

### 5.1.1 Lazo de control de pitch

Se encarga de determinar las referencias de la posición del pitch. Entra en funcionamiento para velocidades por encima de la nominal. Es decir, trabaja en la zona 4. El objetivo cuando estamos trabajando en esta zona es mantener la velocidad nominal y, la potencia o par nominal.

Una vez que se llega a la velocidad nominal, el lazo de par deja de funcionar y entra en funcionamiento el lazo de pitch. A partir de la velocidad del generador de salida, se compara con una velocidad de generador de referencia, y al igual que en el lazo anterior, se genera un error. Ese error es filtrado para eliminar el ruido. Esta señal ya filtrada es la que marca al control de pitch la cantidad de pitch demandada. El objetivo es trabajar a potencia y velocidad nominal el máximo de tiempo posible y no dejar que la velocidad del generador aumente.



El lazo de pitch consiste en unos **filtros de pitch y un PI** (proporcional-integrador). Los filtros tienen de entrada la señal de error en la velocidad del generador. El PI tiene de entrada la señal del error ya filtrada y como salida el pitch demandado. Ese valor de pitch, es mandado a la planta para que actúe o bien aumentando el pitch o disminuyéndolo, en función si se quiere disminuir o aumentar la velocidad del generador, respectivamente.

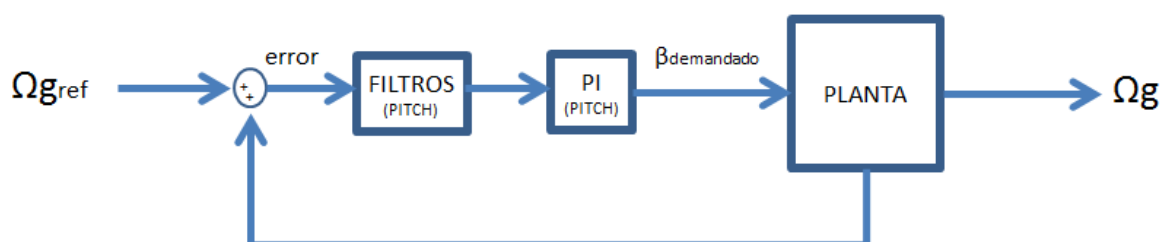


Fig. 41 Esquema lazo de control de pitch

## 5.2 Control elegido como referencia (Baseline)

El controlador que se va a emplear fue desarrollado y utilizado como referencia por Asier Díaz de Corcuera cuyo diseño queda explicado en [3]. En el presente documento nos vamos a centrar en los distintos componentes que permiten el control del aerogenerador tal y como lo ha dividido en dicha tesis:

- **Drive Train Damping (DTD)**
- **Filtros de par**
- **Control de par**
- **ATD (Acceleration Tower Damping)**
- **Filtros de pitch**
- **Control de pitch**

La estructura de todos los componentes del controlador junto con la planta queda de la siguiente manera:

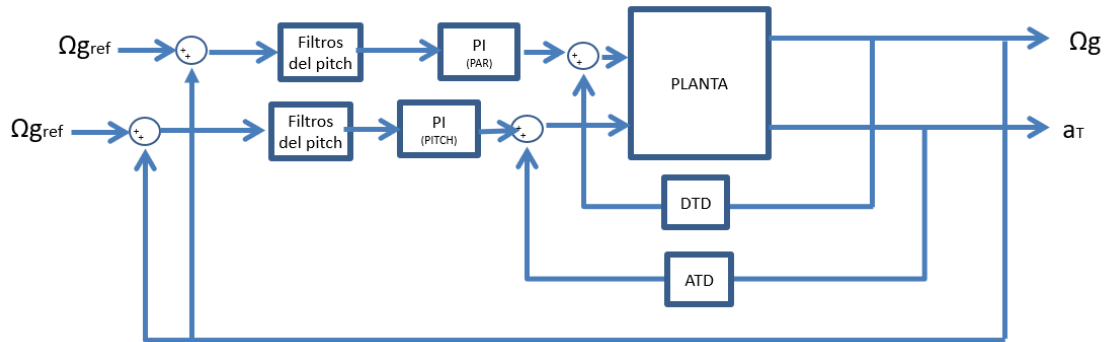


Fig. 42 Esquema componentes controlador y la planta

### 5.2.1 Componentes del controlador

A continuación, se listan los diferentes componentes del controlador. La explicación más en detalle de cada uno de los componentes se puede ver en [3].

#### DTD

La función principal del DTD (Drive Train Damping), consiste en **reducir las cargas** considerablemente en las palas, torre, buje, góndola, eje y multiplicadora. Su diseño es fundamental debido al posible acoplamiento del modo del eje en los diferentes componentes del aerogenerador. De hecho, este elemento se activa tanto en la zona por debajo de la nominal, de transición y por encima de la nominal.

El DTD consiste en una ganancia, un cero real y dos pares de polos complejos (efecto paso de banda) tal y como se explica en [3]. Su expresión la cual queda reflejada en dicho documento es la siguiente:

$$T_{DTD}(s) = K_1 \frac{s(1 + \frac{1}{w_1}s)}{((\frac{1}{w_2})^2 s^2 + 2\xi \frac{1}{w_2}s + 1)}$$

Donde:

$K_1=641.45 \text{ Nms/rad}$

$w_1=193 \text{ rad/s}$

$w_2=10.4 \text{ rad/s}$

$\xi=0.984$

El diagrama de bode del DTD queda de la siguiente forma:

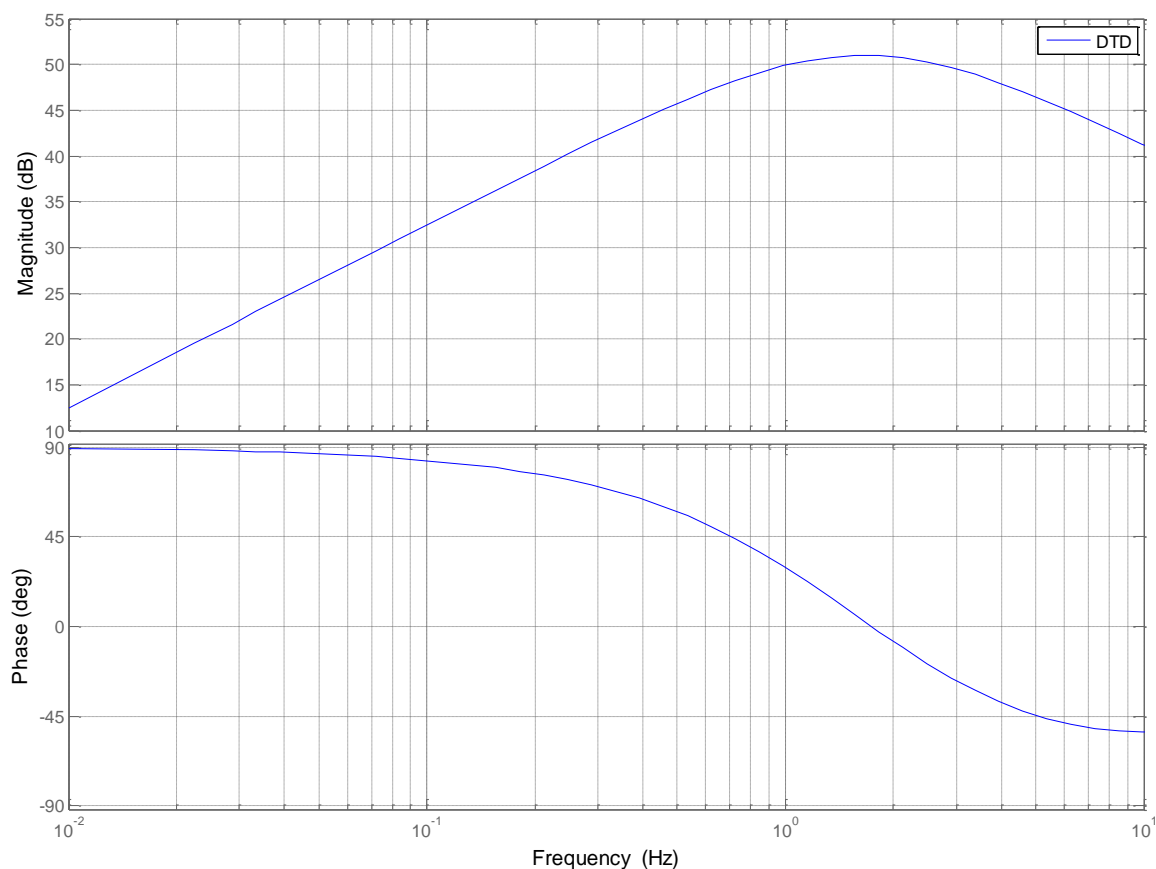


Fig. 43 Diagrama de bode del DTD

### Controlador de par

El control de par entra en funcionamiento en la primera y en la segunda vertical tal y como se ha explicado en el Capítulo 5. Consiste en usar un proporcional integrador (PI) para mantener la velocidad del generador a la velocidad nominal. Además del PI, también se pueden encontrar cuatro notches y un filtro paso bajo, tal y como se observa en la fig.44 Diagrama de bode del controlador de par.

La posición en frecuencia de los notches coincide con las siguientes frecuencias de movimiento:

- 1P
- Segundo modo de la torre side to side.
- Primero del rotor colectivo en el plano.
- Segundo del rotor colectivo en el plano

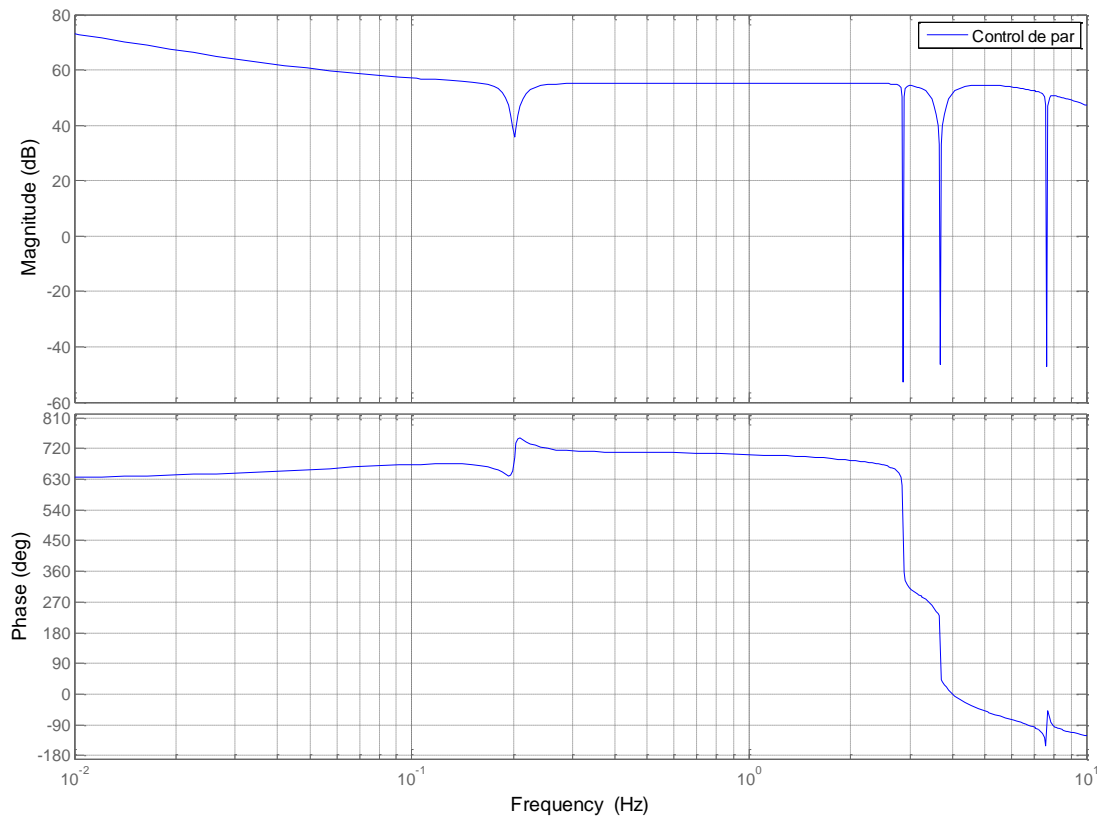


Fig. 44 Diagrama de bode del controlador de par

### ATD

El filtro de amortiguamiento del movimiento fore aft de la torre es diseñado para reducir el efecto del viento en el **primer modo de la torre** (fore aft) en la zona de producción por encima de la nominal. La entrada del filtro es la aceleración de la torre y la salida es una contribución de pitch.

La expresión correspondiente del ATD de [3] es la siguiente:

$$\beta_{fa}(s) = K_{TD} \frac{1}{s} \frac{1 + (2\zeta_{T1}s/w_{T1}) + (s^2/w_{T1}^2)}{1 + (2\zeta_{T2}s/w_{T2}) + (s^2/w_{T2}^2)} a_{Tfa}(s)$$

Donde:

$$K_{TD} = 0.035$$

$$w_{T1} = 1.25 \text{ rad/s}$$

$$w_{T2} = 3.14 \text{ rad/s}$$



$$\zeta_{T1} = 0.69$$

$$\zeta_{T2} = 1$$

La posición en frecuencia de los notches coincide con las siguientes frecuencias de movimiento:

- 1P
- 3P
- Filtro a 1.21 Hz.

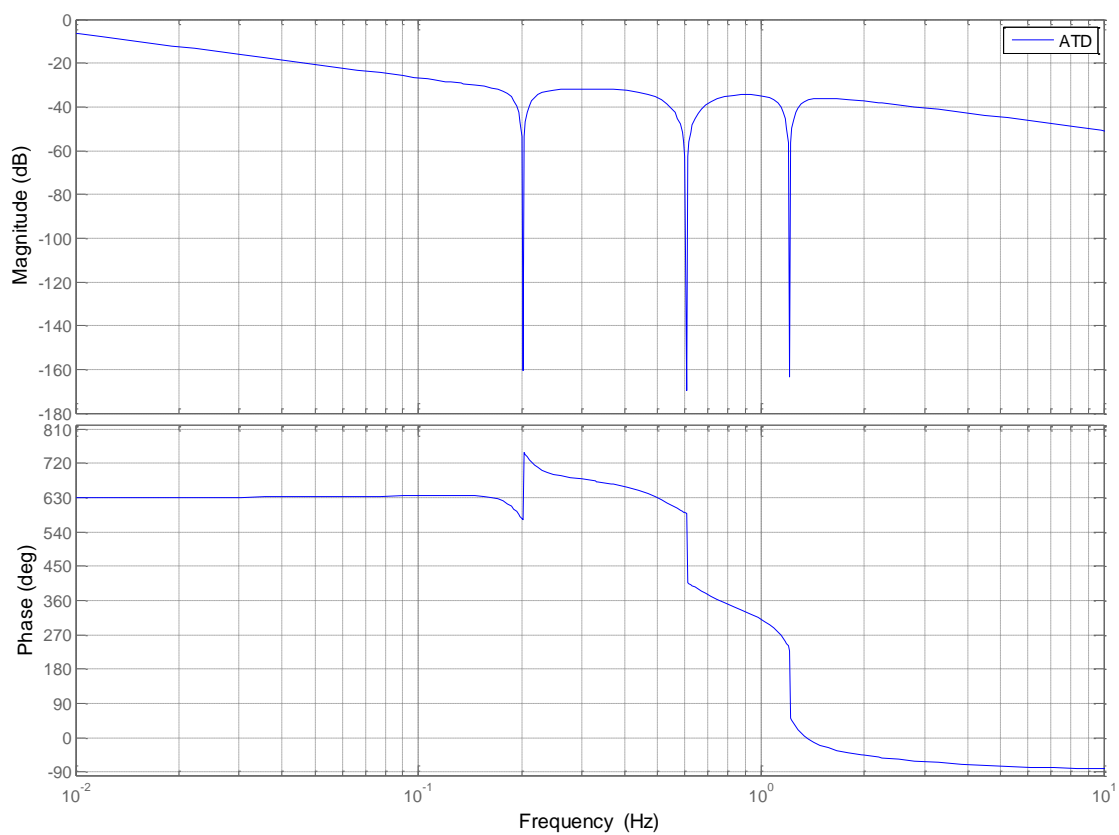


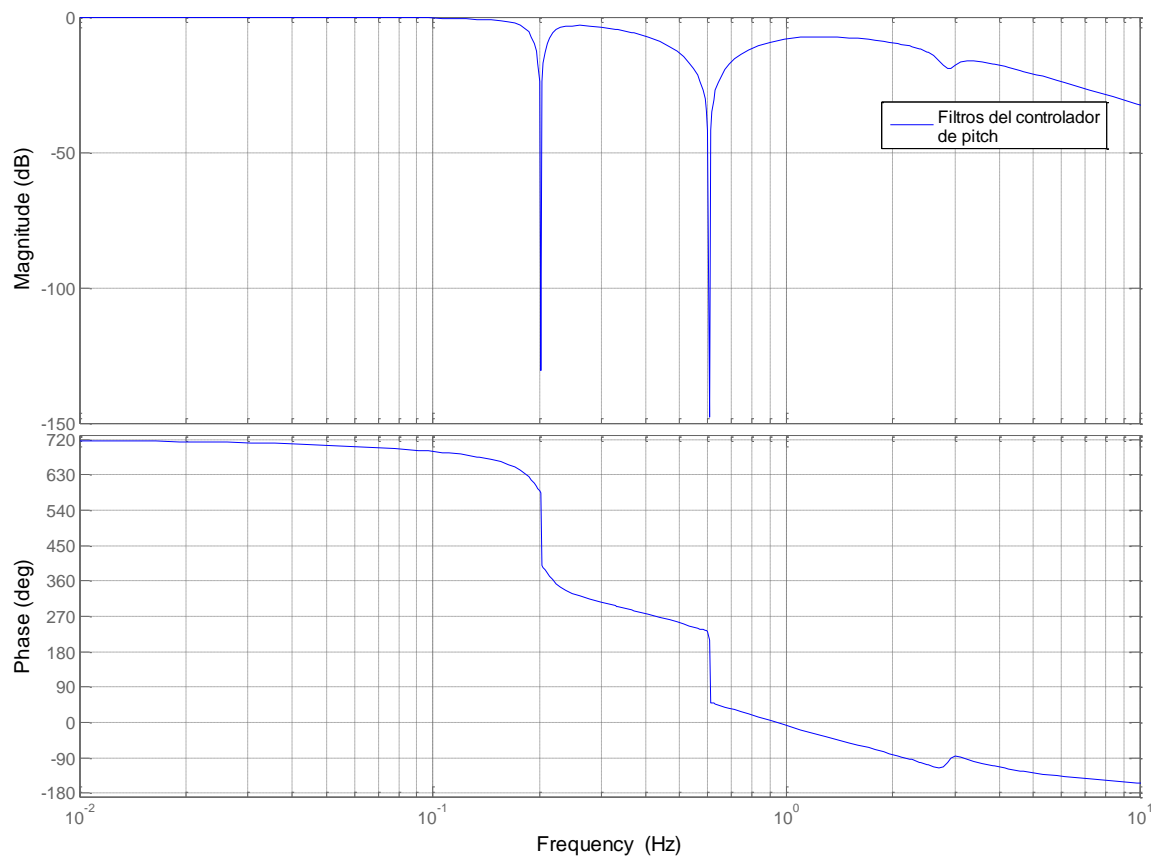
Fig. 45 Diagrama de bode del ATD

### *Filtros del pitch*

La función de los filtros de pitch es filtrar la señal del error para eliminar el ruido. Para ello, se añaden dos filtros notch y un filtro paso bajo.

La posición en frecuencia de los notches coincide con las siguientes frecuencias de movimiento:

- 1P
- 3P
- Segundo modo de la torre side to side



**Fig. 46** Diagrama de bode de los filtros del controlador del pitch

### Controlador de pitch

El controlador de pitch está compuesto por un proporcional y por un integrador. La expresión que sigue es la siguiente:

$$PI = K_p + \frac{K_i}{s}$$

El valor de la  $K_p$  y la  $K_i$  viene determinado en función del ángulo de pitch. Dicha relación viene representada en ambos casos por una recta de pendiente negativa tal y como se observa en la fig.48.

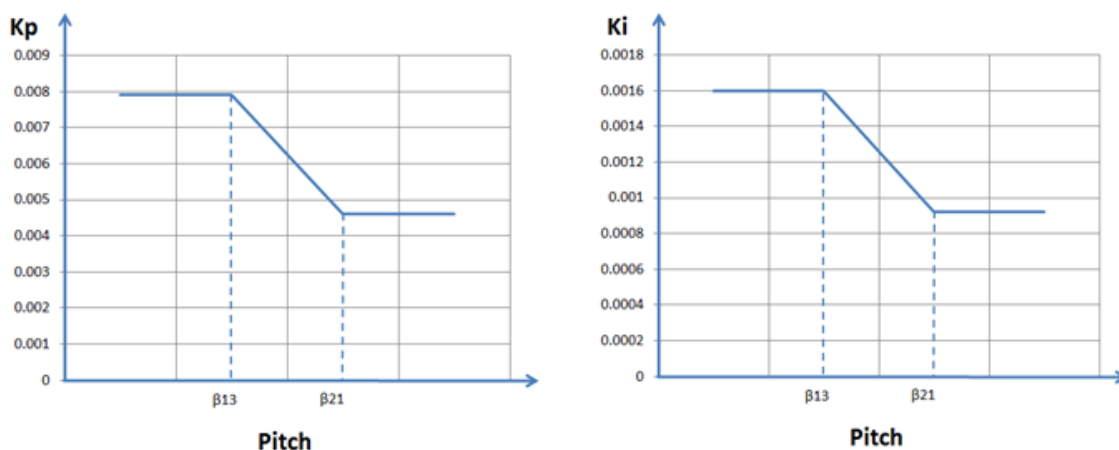


Fig. 47 Representación del valor de  $K_p$  y  $K_i$  del controlador de pitch en función del pitch

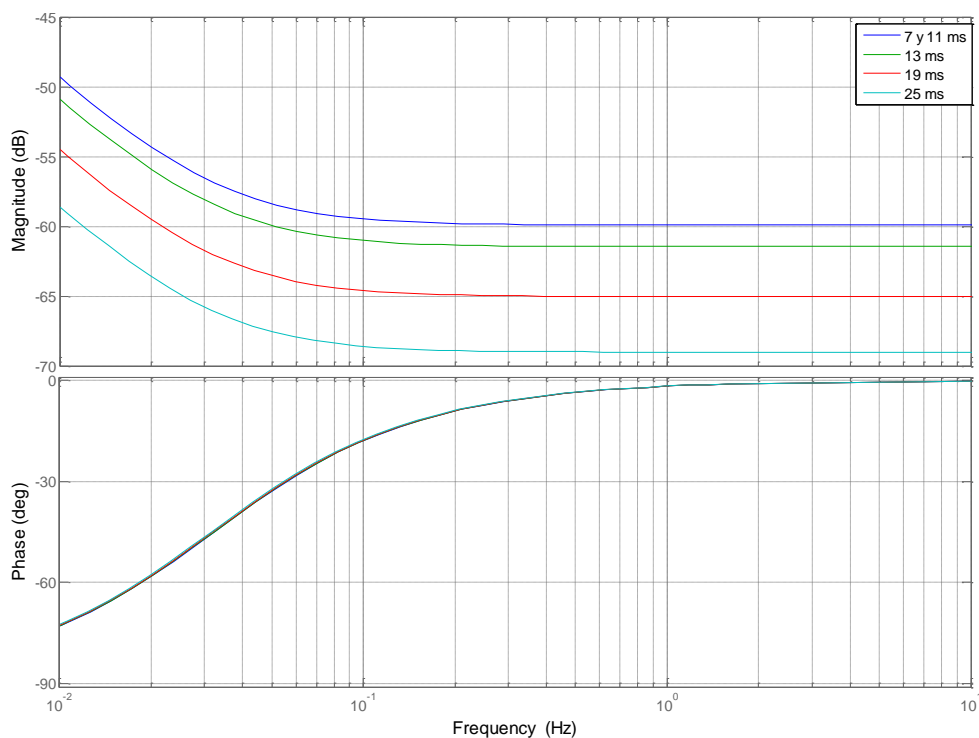


Fig. 48 Diagrama de bode del control de pitch

Tal y como se observa, la ganancia va disminuyendo conforme aumenta la velocidad del viento y en consecuencia el ángulo de pitch. Este es debido a que la  $k_p$  y la  $k_i$  del controlador decrecen conforme aumenta el pitch tal y como se ha mostrado en las gráficas anteriores. Por tanto, la ganancia del PI disminuye.

### 5.2.2 Funcionamiento del controlador en cada punto de operación

A continuación, se detalla tanto la zona como los distintos lazos de control que entran en funcionamiento en función del punto de operación que se encuentre el sistema:

#### *Punto de operación a 7m/s:*

A esta velocidad de viento nos encontraríamos en la **zona dos**, es decir, en la zona cuadrática en la que se trabaja en lazo abierto. En este punto de operación están en funcionamiento:

- **DTD**

A continuación se muestra el diagrama de bode donde se puede apreciar el efecto de incluir el DTD en la planta.

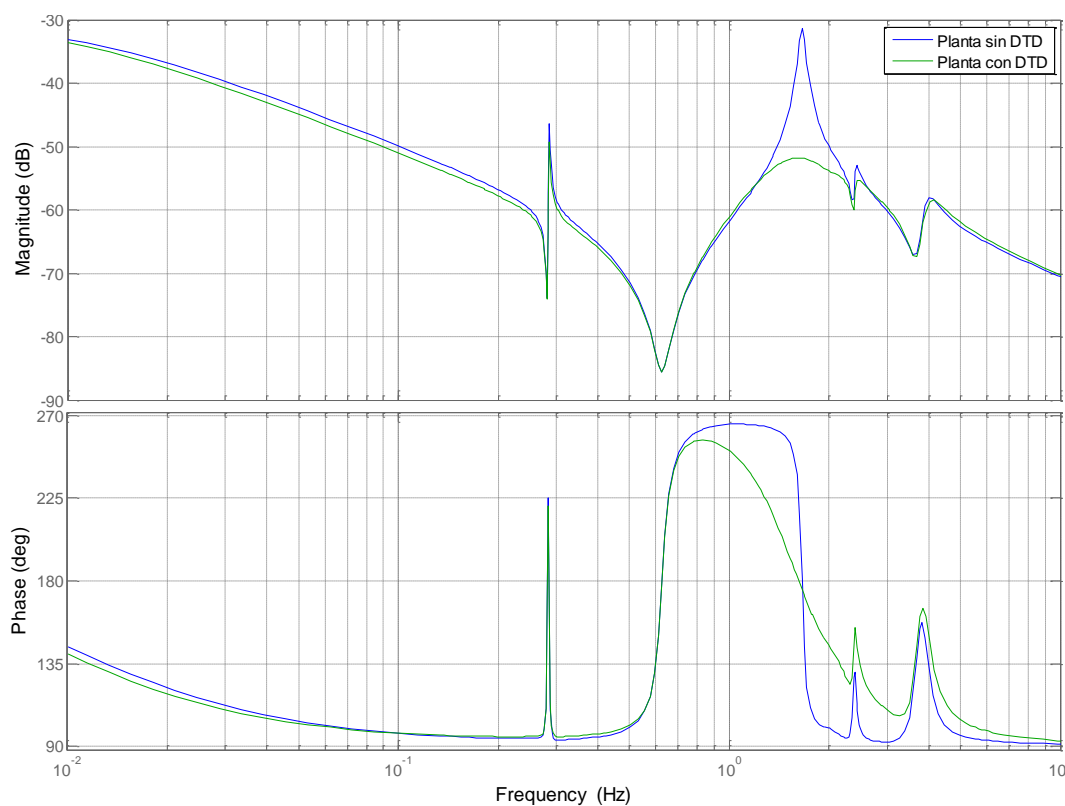


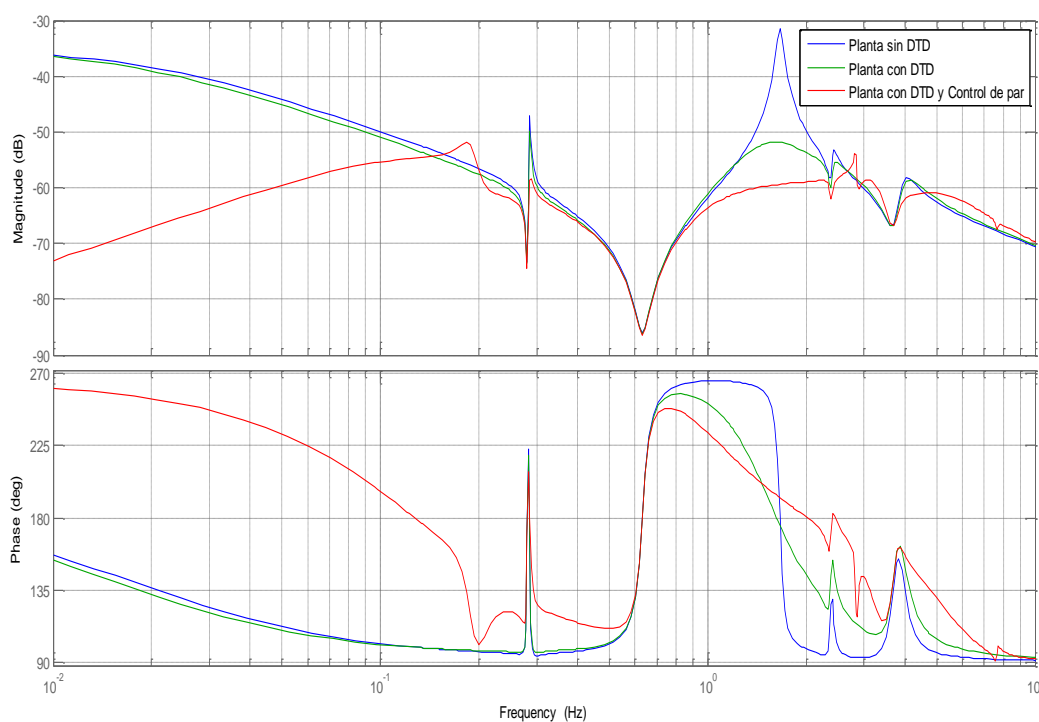
Fig. 49 Bode par - velocidad del generador en el punto de operación a 7 m/s

Puede observarse que, a la frecuencia del eje, 1.66 Hz, es cuando actúa el DTD. Esa frecuencia corresponde con la frecuencia del eje. Gracias al DTD se consigue reducir el pico de oscilaciones que sufre el eje, en aproximadamente algo más de 20 dB de magnitud. Con la adición del DTD, se consigue un mayor amortiguamiento, que el sistema sea más estable y prolongar la vida útil de la máquina y más en concreto del eje.

### *Punto de operación a 11m/s:*

Nos encontramos en la **zona tres** en la curva de potencia o lo que es lo mismo, en la segunda vertical, tal y como puede observarse en la fig. 50. En este punto de operación están en funcionamiento:

- **DTD**
- **Controlador de par**



**Fig. 50 Bode par - velocidad del generador en el punto de operación a 11 m/s**

### Punto de operación a 13 m/s:

Nos encontramos en la **zona cuatro** en la curva de potencia o lo que es lo mismo, trabajando a potencia nominal, tal y como puede observarse en la curva P-N. En este punto de operación están en funcionamiento:

- **DTD**
- **ATD**
- **Controlador de pitch**
- **Filtros del pitch**

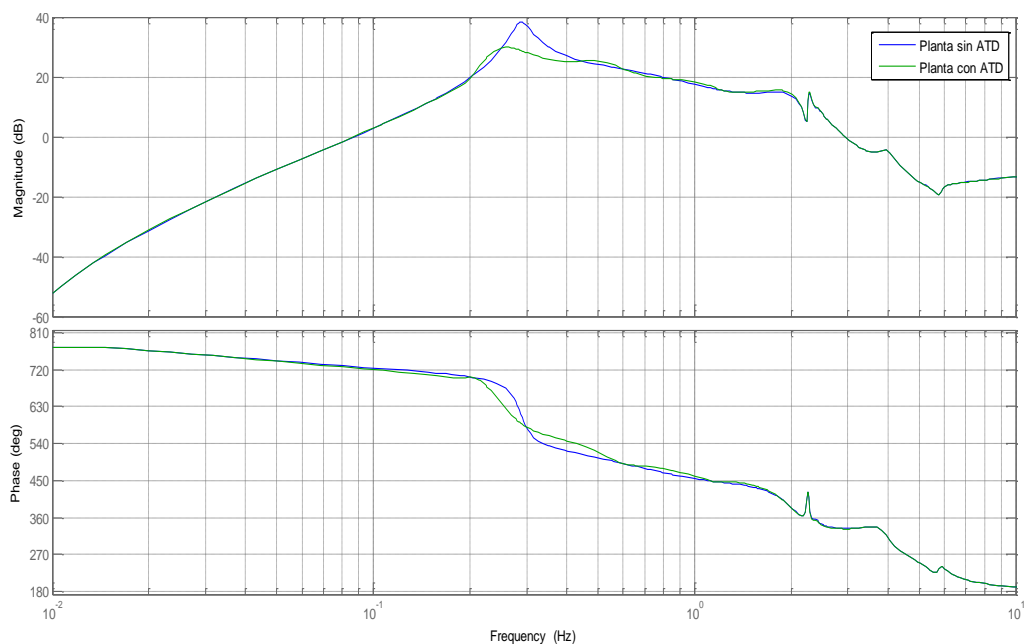


Fig. 51 Bode pitch - aceleración de la torre en el punto de operación a 13 m/s

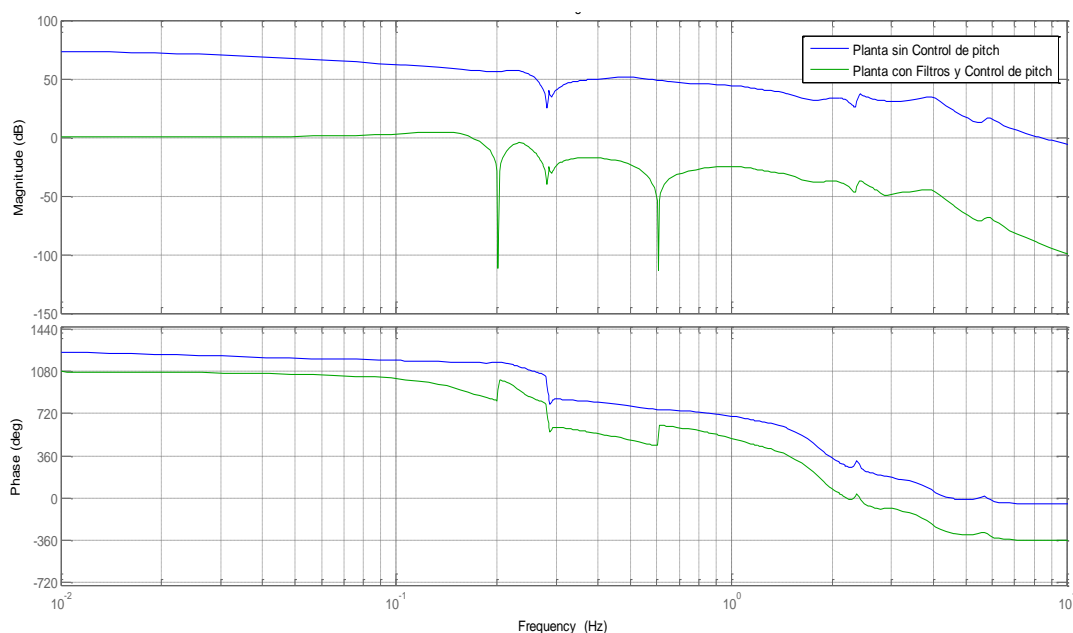


Fig. 52 Bode pitch - velocidad del generador en el punto de operación a 13 m/s

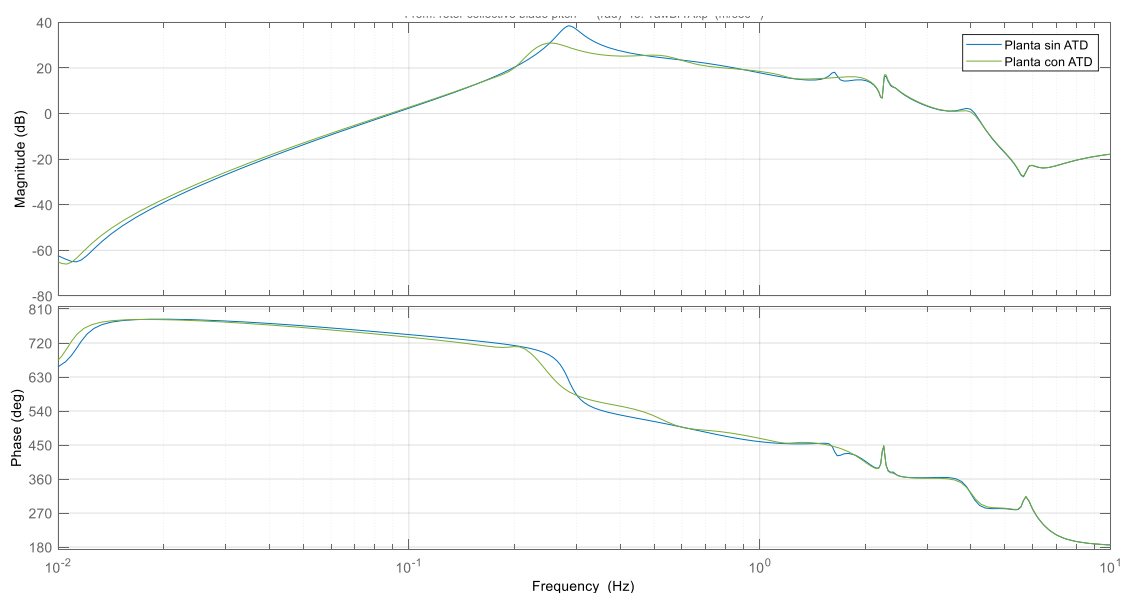
En la fig. 51 se aprecia que en la planta sin ATD que hay un pico a la frecuencia de la torre, 0.28 Hz. Al añadir el ATD en la planta, se logra atenuar dicho pico haciendo que la torre tenga un mayor amortiguamiento y, por tanto, las oscilaciones de la misma sean menores. Con el ATD se logra que el sistema tenga una mayor estabilidad y, además, que las cargas que sufre la torre sean menores.

En el bode representado en la fig. 52 se muestra la actuación de los filtros del pitch y del PI del pitch. Se aprecia como se han introducido los diferentes nothes a la frecuencia que se quiere filtrar.

### *Punto de operación a 19ms:*

Nos encontramos en la **zona cuatro** en la curva de potencia o lo que es lo mismo, trabajando a potencia nominal, tal y como puede observarse en la curva P-N. En este punto de operación están en funcionamiento:

- **DTD**
- **ATD**
- **Controlador de pitch**
- **Filtros de pitch**



**Fig. 53 Bode pitch - aceleración de la torre en el punto de operación a 19 m/s**

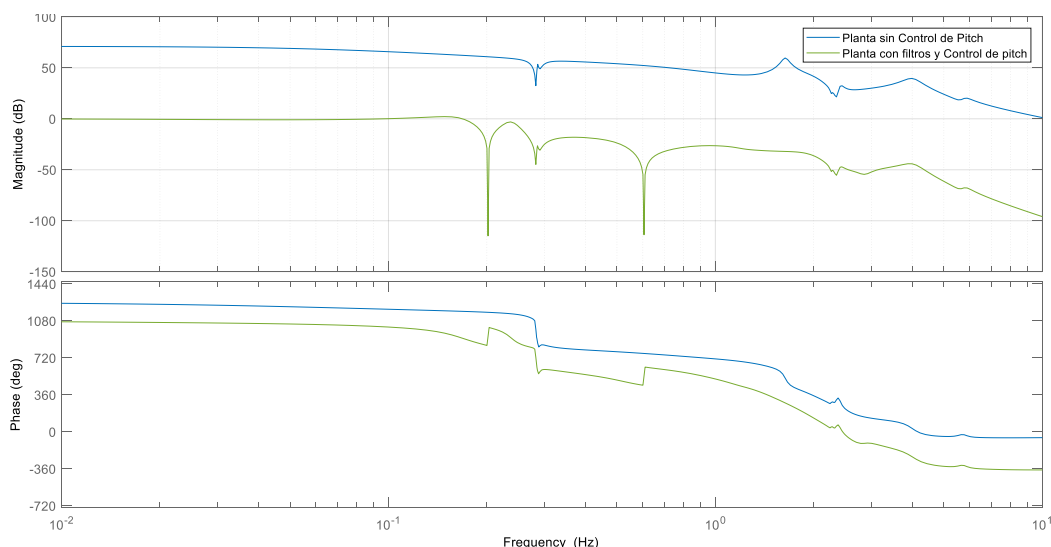


Fig. 54 Bode pitch - velocidad del generador en el punto de operación a 19 m/s

Los diferentes comentarios de los diagramas de bode que se muestran para le punto de operación a 19m/s coinciden con los que se han puesto para el punto de operación de 13m/s.

### *Punto de operación a 25ms:*

Nos encontramos en la **zona cuatro** en la curva de potencia o lo que es lo mismo, trabajando a potencia nominal tal y como puede observarse en la curva P-N. En este punto de operación están en funcionamiento:

- **DTD**
- **ATD**
- **Controlador de pitch**
- **Filtros del pitch**

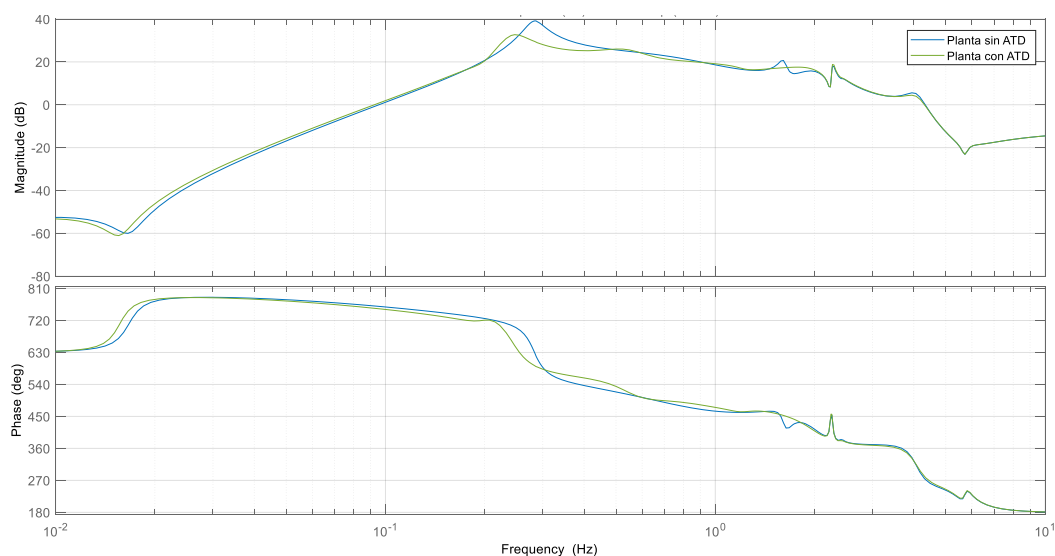


Fig. 55 Bode pitch - aceleración de la torre en el punto de operación a 25 m/s



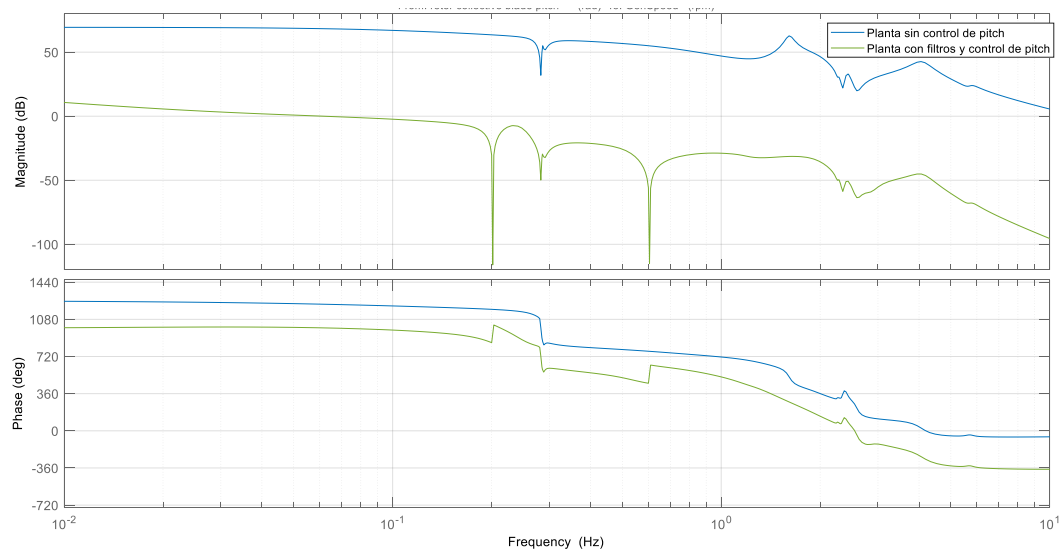


Fig. 56 Bode pitch - velocidad del generador en el punto de operación a 25 m/s

Los diferentes comentarios de los diagramas de bode que se muestran para le punto de operación a 25m/s coinciden con los que se han puesto para el punto de operación de 13m/s.

## 6. ESTUDIO TEÓRICO DE LA INFLUENCIA DE RETRASOS EN EL LAZO DE PITCH

Como se ha dicho anteriormente, el objetivo principal de este Trabajo es desarrollar una estrategia de control inmune a los efectos de los retrasos que se producen en un aerogenerador debido a las **comunicaciones del mismo y a la dinámica de los actuadores**. Por ello, para poder analizar los efectos de dichos retrasos, resulta fundamental entender qué es un retraso y cómo introducirlo en el sistema para poder realizar las simulaciones.

### 6.1 Modelado del retraso

Tal y como se ha visto anteriormente, un aerogenerador está compuesto por múltiples elementos interconectados entre sí para poder funcionar de manera correcta. En concreto, este proyecto se va a centrar en el sistema de control y de regulación del aerogenerador.

Se ha comentado a lo largo del proyecto, que lo que se busca es conseguir en todo momento, a través del controlador, la máxima potencia y, que esto se consigue variando tanto el par como el pitch. Sin embargo, esa variación no se consigue de forma instantánea ya que hay varias comunicaciones entre elementos, lo cual equivale a obtener la información varias muestras por detrás, de la actual. Una muestra es cada intervalo de tiempo que se hace lectura de las distintas variables, para decidir en qué zona de trabajo nos encontramos y qué es lo que se debe hacer para obtener la máxima potencia.

El hecho de que exista esta cadena de comunicaciones, implica la aparición de distintos retrasos, los cuales resulta interesante tener en cuenta en las simulaciones, para poder saber cómo afectan tanto al comportamiento del aerogenerador como a las cargas que soporta.

La existencia de retrasos hace que la señal que recibe el controlador esté desfasada con respecto a la que realmente sale de la planta. Por tanto, por ejemplo, ante una entrada escalón de referencia en nuestro sistema, lo que realmente tendremos es una respuesta que reacciona uno o varios intervalos de tiempo posterior y se aproxima más lentamente a la referencia. Véase el ejemplo representado en la fig. 57.

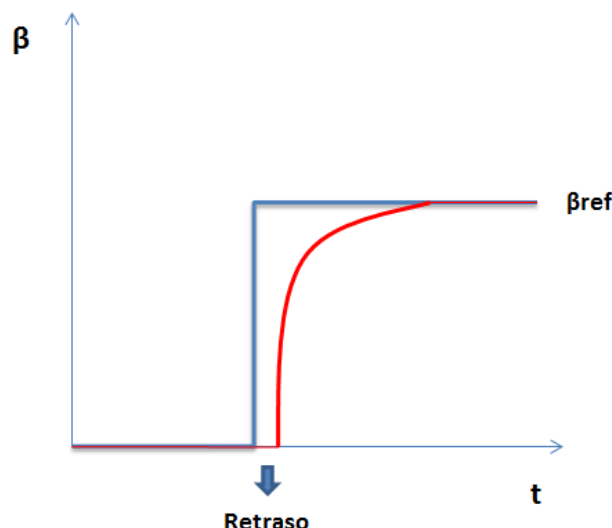


Fig. 57 Ejemplo retraso respecto a la referencia de pitch

En la fig. 57, podemos ver como la referencia de pitch cambia y cómo la línea roja le sigue pero con un desfase, es decir, comienza a variar su valor de pitch más tarde. A ese intervalo de tiempo se le denomina retraso.

Función en azul:  $f(t) = 1(t)$

Función en rojo sería igual a:  $g(t) = 1(t-1)$ .  $(t-1)$  suponiendo que el retraso es de un segundo.

Si hacemos la transformada de Laplace de ambas funciones tendríamos:

$$\mathcal{L}[f(t)] = \frac{1}{s}$$

$$\mathcal{L}[g(t)] = \frac{1}{s} e^{-s}$$

Siendo  $e^{-s}$  equivalente al retraso, pero en continuo. Una de las ventajas de representarlo mediante Laplace, es que se puede graficar y poder así, predecir el comportamiento del sistema.

Se ha de tener en cuenta, que los retrasos que se dan a la hora de controlar un aerogenerador equivalen al número de muestras que va por detrás el controlador con respecto a la variable medida. A cada muestra se le denomina step o tiempo de paso, por tanto, el retraso que se tiene es el número de steps que la señal está por detrás con respecto la señal que no está influenciada por las comunicaciones existentes en el aerogenerador.

A continuación, se muestra un diagrama de bode con distintos retrasos de una función de transferencia unitaria. Se ha realizado para retrasos de 2, 6 y 10 steps. En este caso,

cada step es de 0.01 segundos, ya que cada 0.01 segundo se produce la conexión con el controlador del aerogenerador.

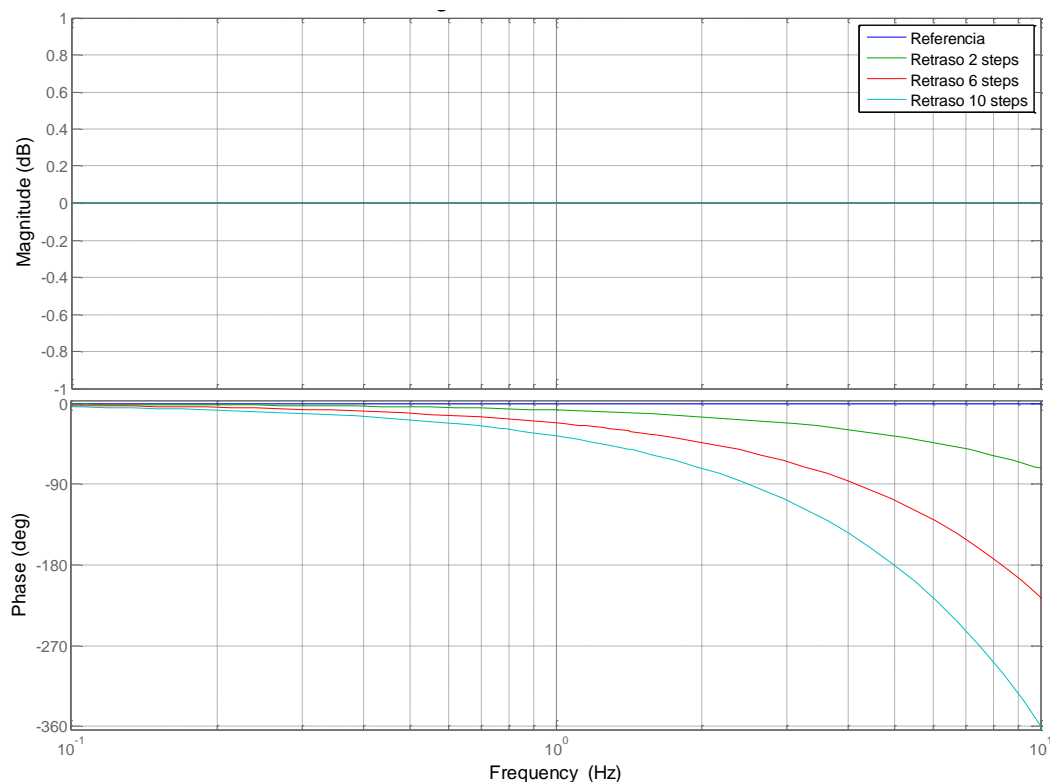


Fig. 58 Diagrama de bode de retrasos

Se aprecia que lo que cambia es la **fase** respecto a la señal original mientras que la ganancia es la misma. Además, cabe destacar que, conforme aumenta el número de retrasos el desfase aumenta con respecto a la señal de referencia.

## 6.2 Estudio del retraso en el lazo cerrado

En este apartado se va a explicar la necesidad que surge de crear una nueva planta para poder evaluar cómo afectan los retrasos en el sistema y cómo se han introducido dichos retrasos.

### 6.2.1 Creación planta perturbada

Inicialmente, los parámetros de entrada al modelo lineal son tres:

- Par [N·m]
- Ángulo de pitch colectivo [rad]
- Velocidad del viento

Mientras que las salidas son once:

- Velocidad del viento [m/s]
- Velocidad del rotor [rpm]
- Potencia del generador [kW]
- Velocidad del generador [rpm]
- Par del generador [kN·m]
- Momento en la base de la torre [kN·m]
- Par del rotor [kN·m]
- Pitch [deg]
- Fuerza en el eje [kN]
- Momento en el eje [kN·m]
- Aceleración de la torre [m/s<sup>2</sup>]

Sin embargo, los parámetros de entrada que se tienen no son suficientes para poder analizar el efecto de los retrasos en el sistema. Esto es debido a que resulta fundamental el estudio de las sensibilidades de seguimiento de referencia y de rechazo a perturbaciones externas. Estas perturbaciones externas no las tiene de por sí la Planta por lo que hay que introducirlas. Para ello, se debe crear una planta en la que, en vez de tener tres entradas, tenga cinco. Estas dos nuevas entradas serán perturbaciones en la velocidad del generador y en la aceleración de la torre. A esta nueva planta se le ha llamado **Planta Perturbada** donde la lista de entradas es la siguiente:

- Par [N·m]
- Ángulo de pitch colectivo [rad]
- Velocidad del viento
- Perturbación en la velocidad del generador
- Perturbación de la aceleración de la torre

Las salidas de la Planta Perturbada son las mismas que la Planta inicial. A partir de este punto se trabaja con la Planta Perturbada para realizar cualquier análisis en el modelo lineal.

### 6.2.2 Inclusión de retrasos en el sistema

En este proyecto se analiza cómo afectan los retrasos en el lazo de pitch. Para ello, se va a tener en cuenta tanto los retrasos en las comunicaciones como los debidos a la dinámica de los actuadores.

Por tanto, se van a introducir retrasos en la lectura de la velocidad del generador a la salida de la planta y en el control del pitch. La cantidad de retrasos que se van a introducir en cada caso no es la misma debido a que en cada uno de los casos se ha analizado los distintos retrasos que pueden darse.

### *Inclusión de retrasos en la lectura de la velocidad del generador a la salida de la planta*

En este caso, los retrasos que pueden darse son los debidos a las comunicaciones. En este tipo de retrasos podemos encontrar diferentes elementos que los generan como los sensores de pitch, de velocidad del generador..., las redes de comunicaciones... y cualquier elemento que forme parte de este circuito. Por tanto, los retrasos que pueden darse no tienen un valor elevado, son del orden de los milisegundos como mucho.

Por tanto, se van a añadir retrasos en la lectura de la velocidad del generador de salida, después del DTD. El nuevo esquema del sistema teniendo en cuenta dichos retrasos queda reflejado en la fig. 55.

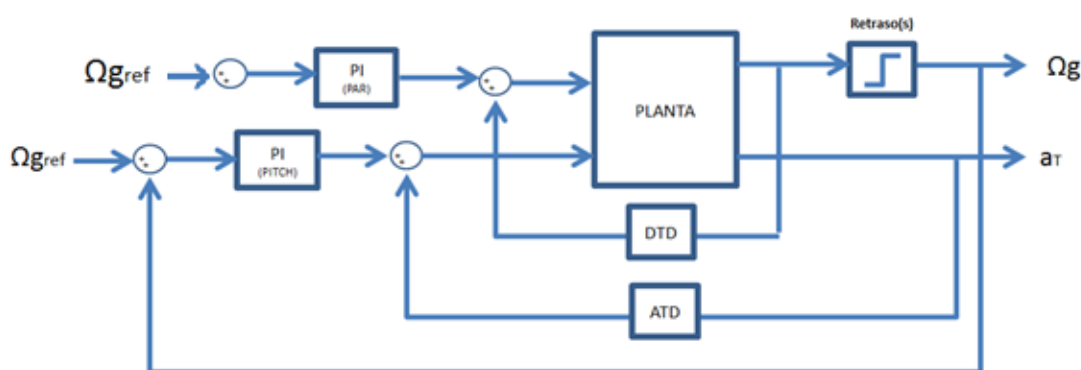


Fig. 59 Esquema sistema con retrasos a la salida de la planta

Como se ha explicado en el apartado 6.1, la cantidad de retrasos que se desean introducir equivale al número de muestras que se quieren leer o ejecutar con retraso. Por ejemplo, al introducir un retraso de dos steps, estaremos haciendo que la velocidad del generador que se recibe para compararla con la velocidad de referencia sea la velocidad dos veces anterior y no la actual. Por ello, para el caso de dos steps estaremos introduciendo 0.02 segundos de retraso (20 milisegundos). Esto sería extrapolable a cualquier cantidad de steps de retraso introducidos en dicha lectura.

Hay que tener en cuenta que se toma una muestra cada 0.01 segundos, lo que equivaldría a un paso. De esta manera, se puede saber la cantidad de segundos de retraso que se están introduciendo.

La manera de introducir estos retrasos en el modelo lineal es utilizando la función **"OutputDelay"** de Matlab. Se trata de un vector numérico en el que se introduce el tiempo de retraso que se desea añadir a cada una de las salidas que tiene el sistema.

Para el caso en el que introducimos el retraso en la velocidad del generador, la cual se encuentra en la salida 4, se debe introducir de la siguiente forma :

Planta con retraso en la lectura de la velocidad del generador =  
`ss (APlanta,BPlanta,CPlanta,DPlanta,'OutputDelay',[0;0;0;retraso;0;0;0;  
0;0;0;0]);`

Donde APlanta, BPlanta, CPlanta y DPlanta son las distintas matrices que forman el sistema teniendo en cuenta tanto el DTD como el ATD. Donde pone retraso se introduce la cantidad de segundos que se desee retrasar la señal.

A continuación, con el siguiente código se le indica la posición de las entradas a la que afecta dicho retraso, la cual en nuestro caso es a la referencia de velocidad (posición 2):

Planta con retraso en el control de pitch(:,2).

Una vez hecho esto, tan solo quedar cerrar el lazo del control de pitch de la planta. Así, ya tendremos completo el sistema.

### *Inclusión de retrasos en el control de pitch*

En este caso, se va a tener en cuenta que los retrasos pueden ser debidos tanto a las comunicaciones entre los elementos como a la dinámica del actuador de pitch. Los retrasos que se dan son más elevados que en el caso anterior, ya que los retrasos debidos a los actuadores son elevados al tener que interferir de manera mecánica en la posición de la pala. Además, con el crecimiento de las máquinas, el tiempo de actuación es cada vez mayor. Por ello, podemos encontrar retrasos de hasta medio segundo, es decir, de 50 pasos en este caso.

De la misma manera que en el caso anterior, se introducen distintos retrasos en el pitch demandado por la planta. Es decir, una vez se ha sumado el pitch obtenido tras el ATD y el pitch que resulta después del lazo de pitch.

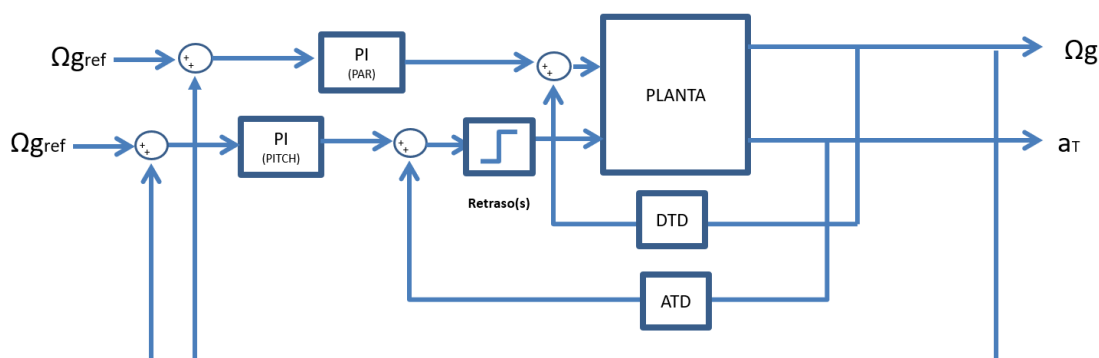


Fig. 60 Esquema sistema con retrasos en la demanda de pitch

Para introducir dichos retrasos en el modelo lineal, se emplea de nuevo la función de MATLAB “OutputDelay” pero en este caso: en el punto marcado en la Fig. 48. En este caso, se introducen por medio de una función de transferencia de la siguiente manera:

`Retraso Controlador = tf(1,1,'OutputDelay',retraso) .`

Donde pone retraso se introduce la cantidad de segundos que se desee retrasar la señal.

Finalmente, utilizando MATLAB se construye el nuevo sistema teniendo en cuenta esta nueva función de transferencia.

### 6.2.3 Análisis del efecto de los retrasos en el sistema

En este apartado se va a analizar cómo afectan los retrasos en el sistema. El estudio se ha llevado a cabo en los puntos de operación a 13, 19 y 25 m/s porque es donde está activo el ATD y el lazo de pitch. Las respuestas que se van a analizar son las siguientes:

- **Dominio de la frecuencia**
  - **Lazo abierto.** Se analizan los márgenes de estabilidad, el margen de ganancia y el de fase.
  - **Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch.** Consiste en analizar la capacidad que tiene el sistema a seguir la referencia, es decir, la velocidad de generador de referencia.
  - **Sensibilidad de rechazo a perturbaciones del lazo de pitch.** Consiste en analizar la capacidad que tiene el lazo de pitch de rechazar perturbaciones externas que sufre. Es decir, capacidad de no inmutarse ante perturbaciones.
  - **Sensibilidad de rechazo a perturbaciones del ATD.** Se trata de lo mismo que el anterior, pero en vez de la capacidad que tiene el lazo de pitch es la capacidad que tiene el ATD.
  - **Efecto del viento sobre la velocidad del generador.** Se analiza cualquier perturbación del viento y cómo afecta a la velocidad del generador.
  - **Efecto del viento sobre el pitch.** Se analiza cualquier perturbación del viento y cómo afecta al pitch.
  - **Efecto del viento sobre la aceleración de la torre.** Se analiza cualquier perturbación del viento y cómo afecta a la aceleración de la torre.
- **Dominio del tiempo**
  - **Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento del lazo de pitch.**
  - **Respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del lazo de pitch.**
  - **Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador.**
  - **Respuesta escalón efecto del viento sobre la aceleración de la torre.**
  - **Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch.**



### Resultados en el modelo lineal de la Inclusión de retrasos en la lectura de la velocidad del generador a la salida de la planta

Se van a mostrar las diferentes figuras y puntos más relevantes para el **punto de operación a 19 m/s**. Las figuras para los puntos de operación de 13 y 25 m/s, se pueden encontrar en el ANEXO I.

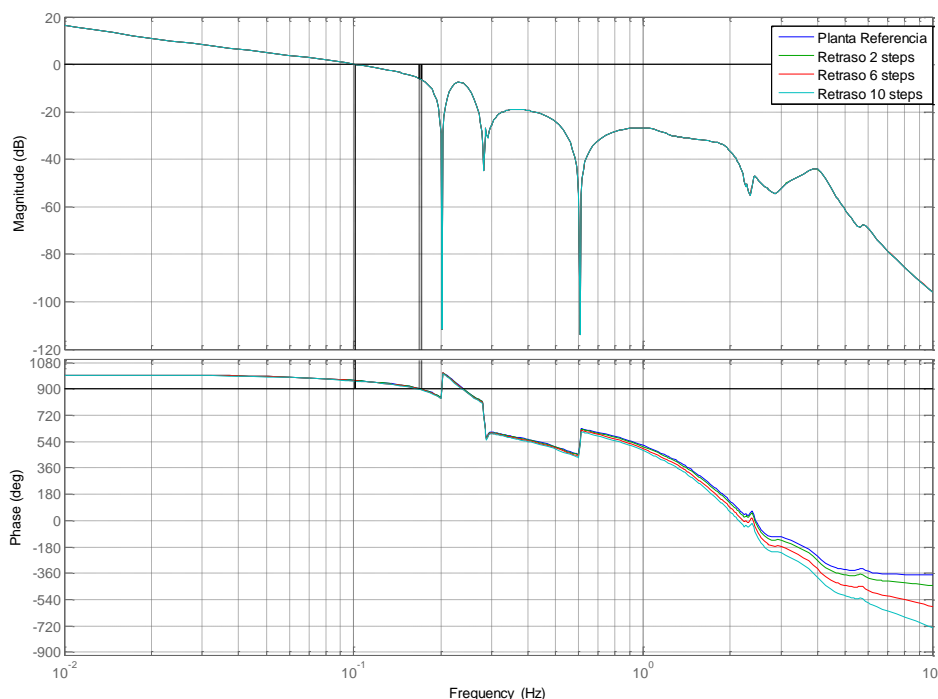


Fig. 61 Lazo Abierto (Punto de operación a 19m/s)

En la fig.61 se muestra el lazo abierto teniendo como entrada el pitch y como salida la velocidad del generador.

Tabla 9 Datos márgenes de estabilidad del Lazo Abierto (Punto de operación a 19m/s)

| Márgenes de estabilidad del Lazo Abierto |                         |                      |
|--|-------------------------|----------------------|
| Sistema                                  | Margen de ganancia [dB] | Margen de fase [deg] |
| Planta Referencia                        | 6.60                    | 58.60                |
| Retraso 2 steps                          | 6.45                    | 57.90                |
| Retraso 6 steps                          | 6.15                    | 56.50                |
| Retraso 10 steps                         | 5.87                    | 55.00                |

Se aprecia en los datos recogidos en la Tabla 9 que el valor tanto del margen de ganancia como el de fase disminuye conforme aumenta la cantidad de retrasos. En el caso de 10 steps de retraso el margen de ganancia es inferior a 6.

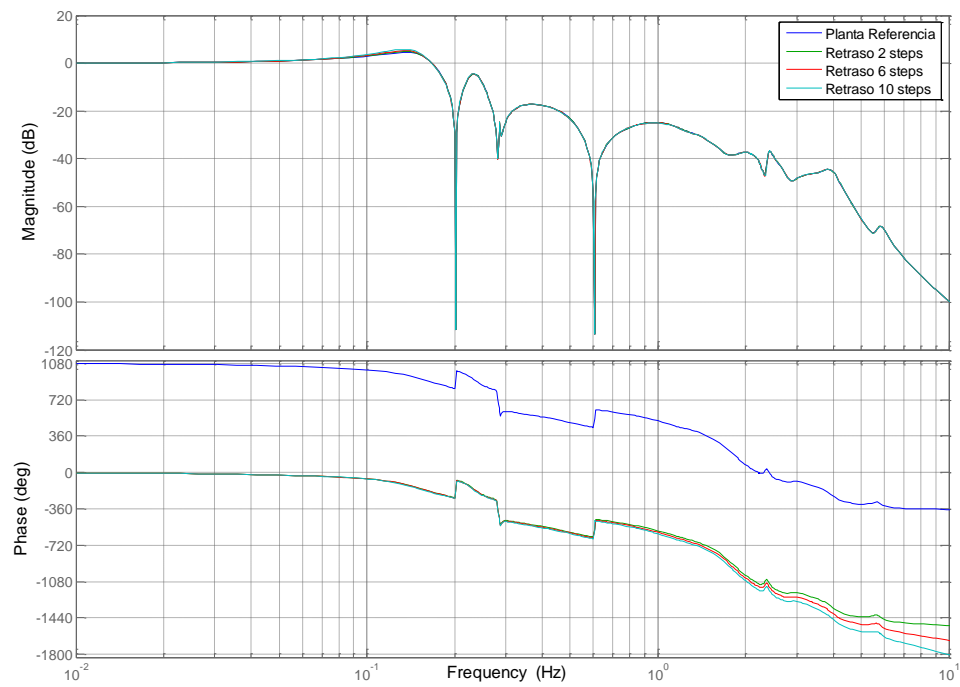


Fig. 62 Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

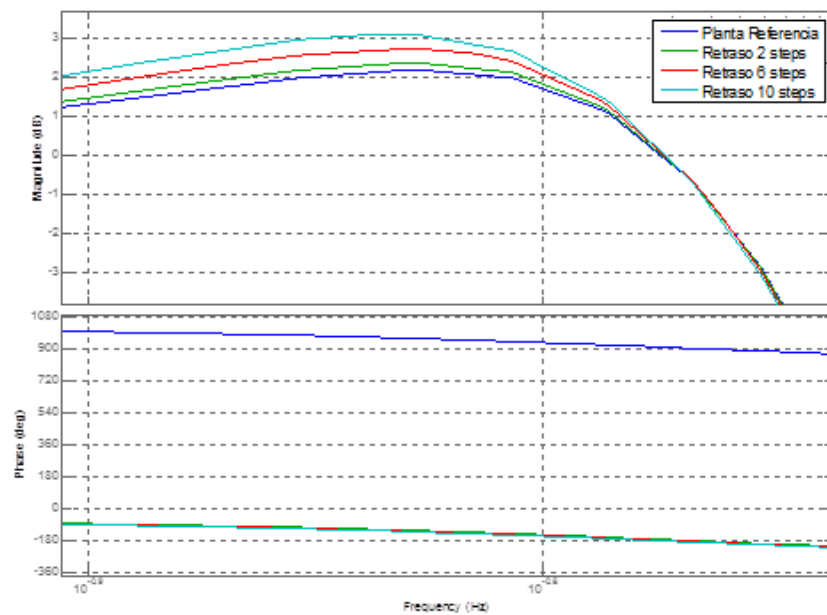


Fig. 63 Zoom Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

Tabla 10 Datos sensibilidad de seguimiento del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)

| Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch |         |           |
|---|---------|-----------|
| Sistema   | WB [Hz] | Pico [dB] |
| Planta Referencia   | 0.1773  | 2.191     |
| Retraso 2 steps   | 0.1773  | 2.373     |
| Retraso 6 steps   | 0.1771  | 2.738     |
| Retraso 10 steps  | 0.1771  | 2.738     |

Se aprecia que el ancho de banda del sistema disminuye conforme aumenta la cantidad de retrasos, por tanto, el sistema se vuelve más lento. Además, el pico aumenta con la inclusión de los retrasos.

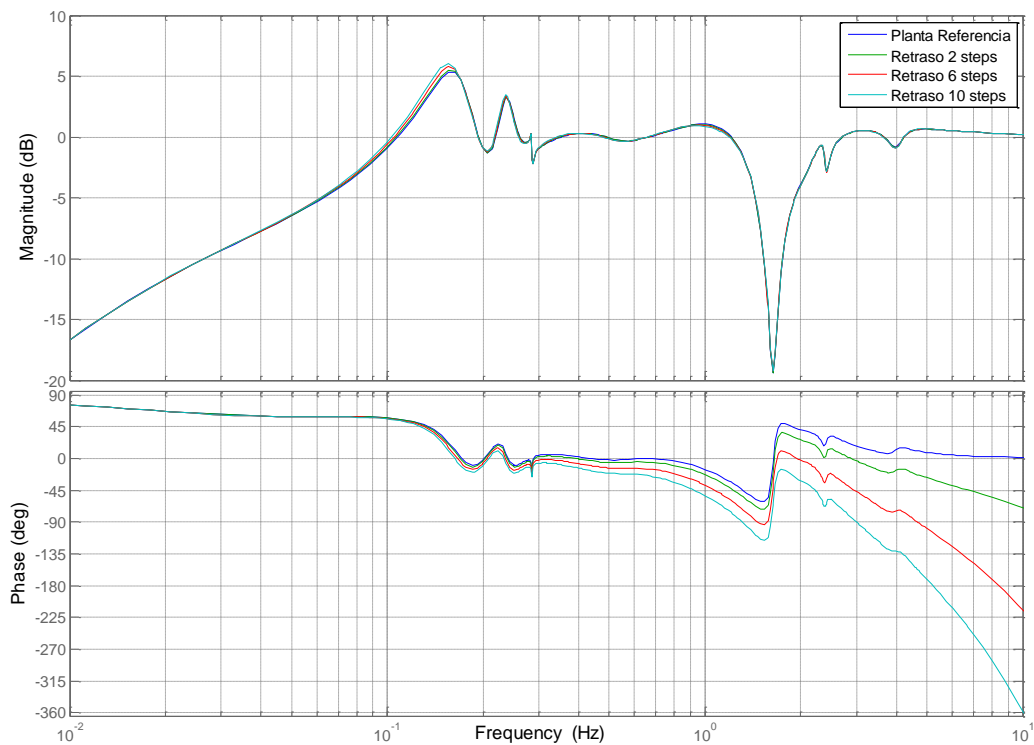


Fig. 64 Sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

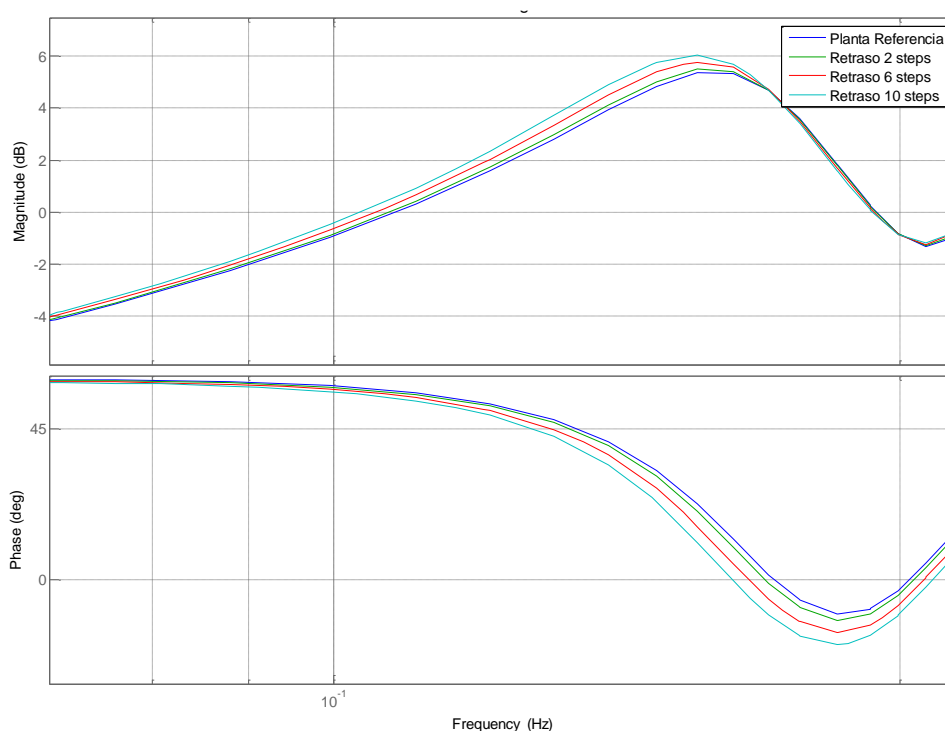


Fig. 65 Zoom Sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

Tabla 11 Datos sensibilidad de rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)

| Sensibilidad de rechazo a perturbaciones del lazo de pitch |         |           |
|--|---------|-----------|
| Sistema  | WB [Hz] | Pico [dB] |
| <b>Planta Referencia</b>                                   | 0.08117 | 5.349     |
| <b>Retraso 2 steps</b>                                     | 0.0859  | 5.349     |
| <b>Retraso 6 steps</b>                                     | 0.07963 | 5.771     |
| <b>Retraso 10 steps</b>                                    | 0.07863 | 6.03      |

Al igual, que para el caso de sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch, el ancho de banda disminuye y el pico aumenta.

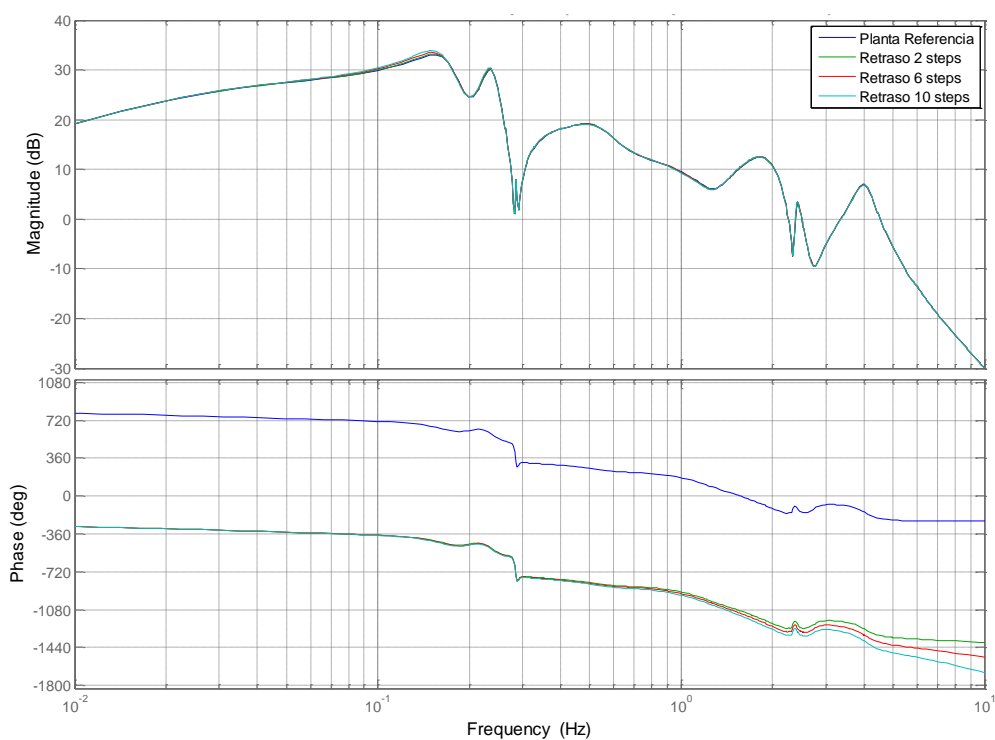


Fig. 66 Efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

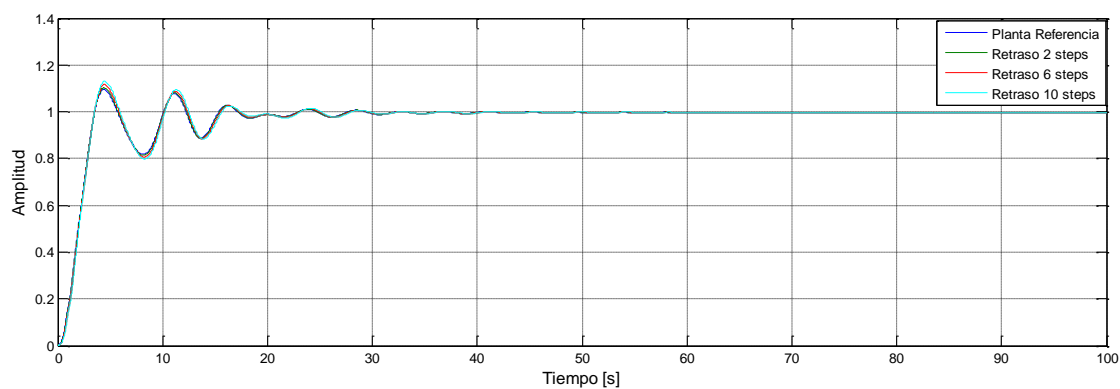


Fig. 67 Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)

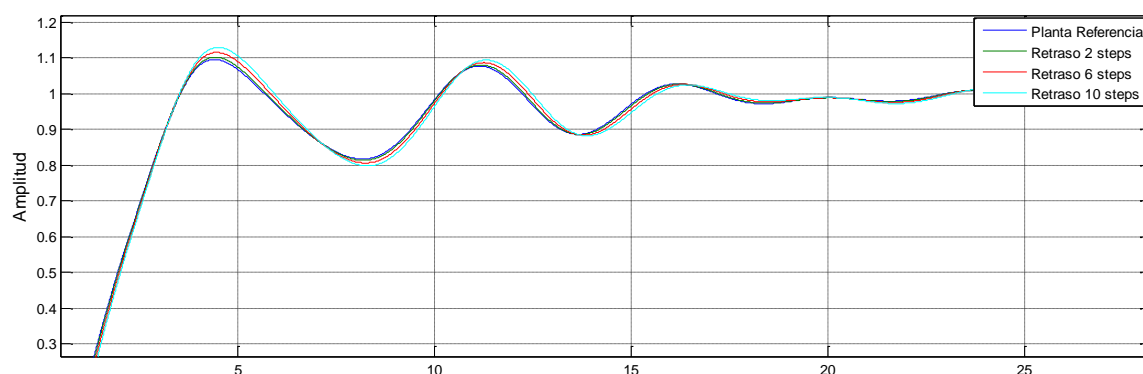


Fig. 68 Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)

Tabla 12 Datos respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

| Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del s-control |      |        |
|---|------|--------|
| Retraso   | Mp   | Ts [s] |
| Planta Referencia   | 1.09 | 14.77  |
| Retraso 2 steps   | 1.10 | 14.82  |
| Retraso 6 steps   | 1.12 | 14.93  |
| Retraso 10 steps  | 1.13 | 15.04  |

En la tabla anterior puede verse que conforme se introducen una mayor cantidad de retrasos aumenta tanto el sobreimpulso como el tiempo de estabilización.

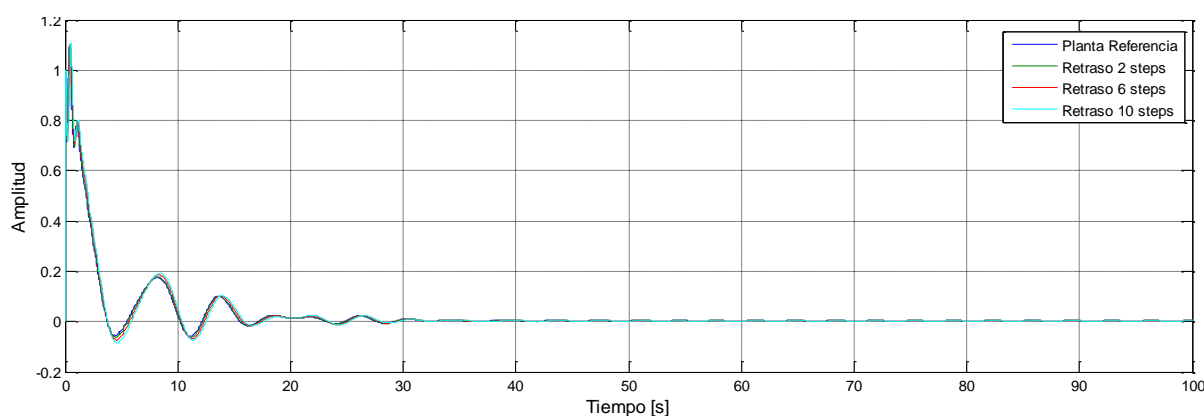


Fig. 69 Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento a perturbaciones lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)

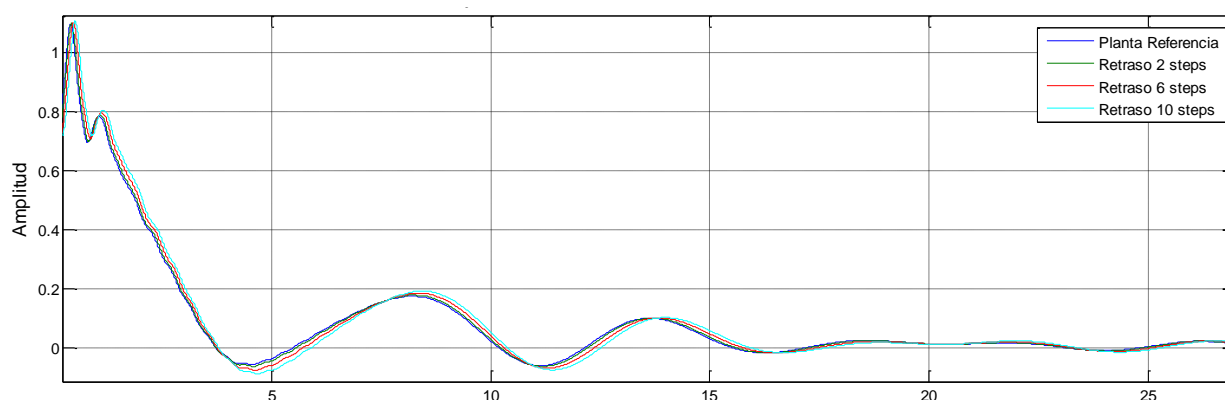


Fig. 70 Zoom respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)

Tabla 13 Datos respuesta escalón sensibilidad de rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)

| Respuesta escalón sensibilidad de rechazo a perturbaciones del s-control |      |        |
|--|------|--------|
| Retraso  | Mp   | Ts [s] |
| Planta Referencia  | 1.09 | 14.75  |
| Retraso 2 steps  | 1.10 | 14.83  |
| Retraso 6 steps  | 1.10 | 14.98  |
| Retraso 10 steps   | 1.11 | 15.14  |

En la tabla anterior puede verse que conforme se introducen una mayor cantidad de retrasos aumenta tanto el sobreimpulso como el tiempo de estabilización.

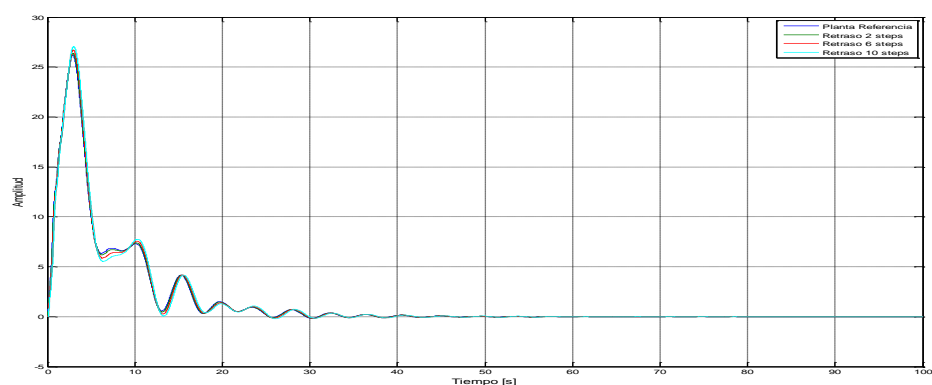


Fig. 71 Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

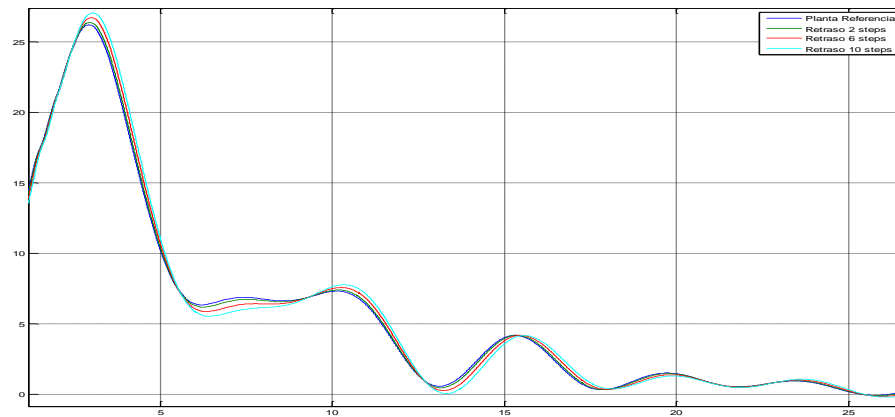


Fig. 72 Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

Tabla 14 Datos respuesta escalón efecto del viento en la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

| Respuesta escalón efecto viento en la velocidad del generador |       |        |
|---|-------|--------|
| Retraso   | Mp    | Ts [s] |
| Planta Referencia   | 26.36 | 45.71  |
| Retraso 2 steps   | 26.36 | 45.71  |
| Retraso 6 steps   | 26.70 | 54.09  |
| Retraso 10 steps  | 29.50 | 62.14  |

En la tabla anterior puede verse que conforme se introducen una mayor cantidad de retrasos aumenta tanto el sobreimpulso como el tiempo de estabilización.



### Resultados en el modelo lineal de la Inclusión de retrasos en el control de pitch

Se van a mostrar las diferentes figuras y puntos más relevantes para el **punto de operación a 19 m/s**. Las figuras para los puntos de operación de 13 y 25 m/s, se pueden encontrar en el ANEXO II.

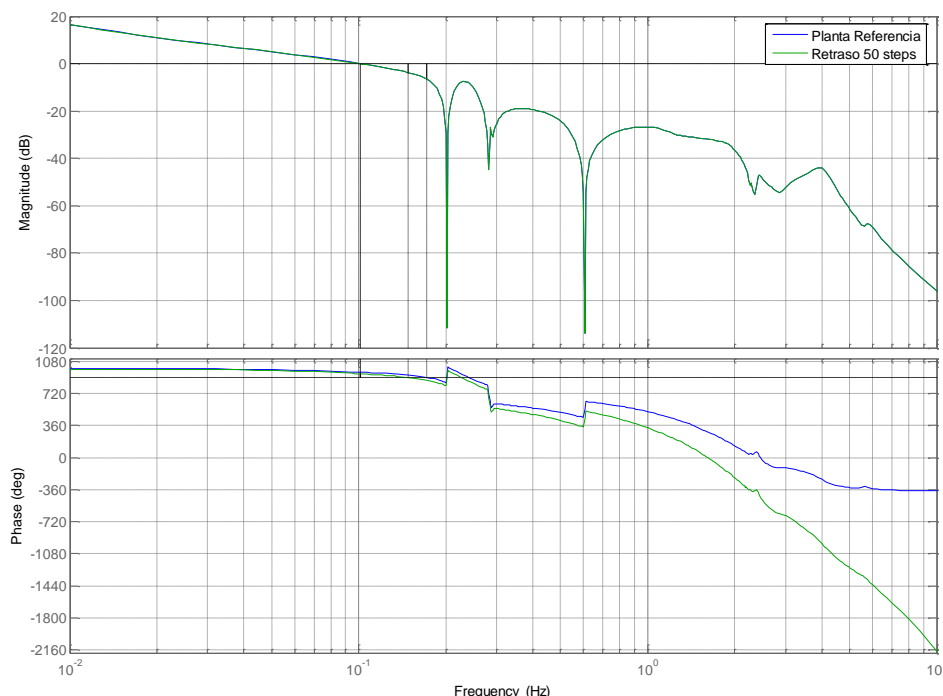


Fig. 73 Lazo Abierto (Punto de operación a 19m/s)

Tabla 15 Datos márgenes de estabilidad del Lazo Abierto (Punto de operación a 19m/s)

| Márgenes de estabilidad del Lazo Abierto |                         |                      |
|--|-------------------------|----------------------|
| Sistema                                  | Margen de ganancia [dB] | Margen de fase [deg] |
| Planta Referencia                        | 6.66                    | 58.80                |
| Retraso 50 steps                         | 3.72                    | 40.60                |

Se puede apreciar en los datos recogidos en la tabla que ambos márgenes descienden considerablemente teniendo en cuenta los retrasos. De hecho, desciende hasta un valor en el que se considera un margen insuficiente en el lazo cerrado ya que se exige que como mínimo se tiene que tener un margen de ganancia y de fase igual o superior a 6 y 30 respectivamente.

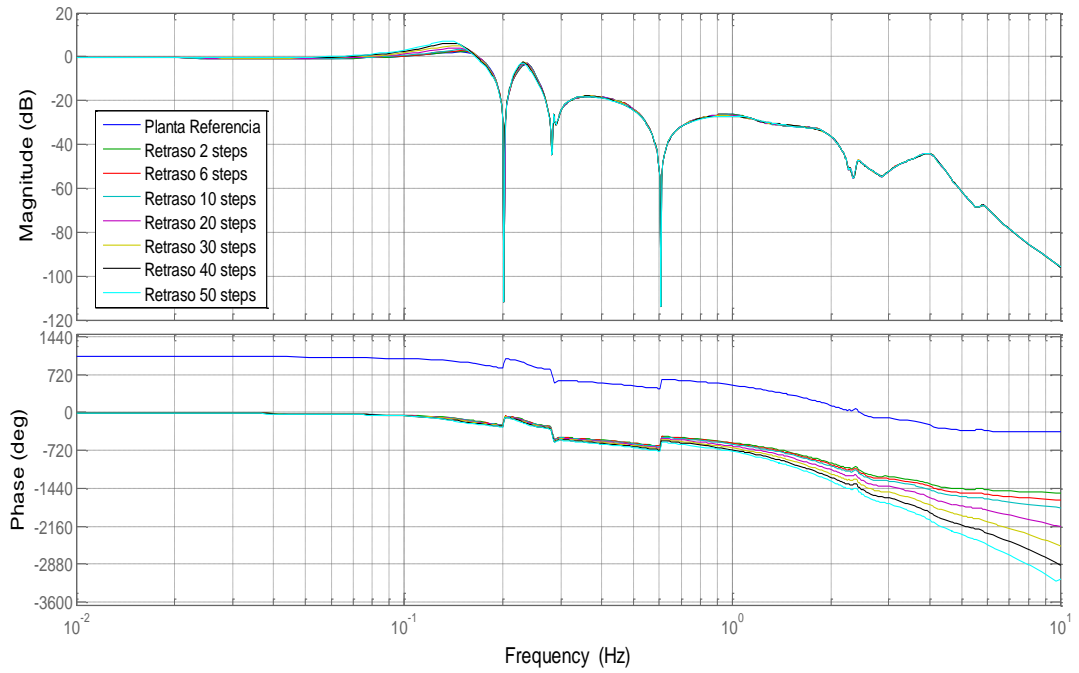


Fig. 74 Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

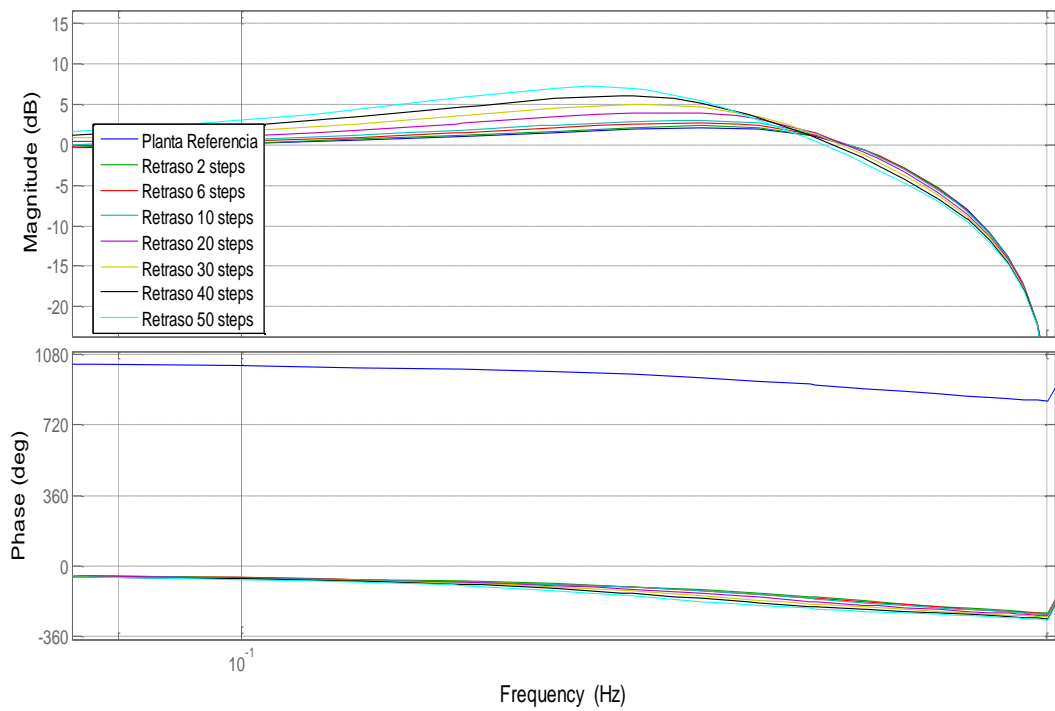


Fig. 75 Zoom sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

Tabla 16 Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

| Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch<br>(Punto de operación a 19m/s) |         |           |
|---|---------|-----------|
| Retraso   | WB [Hz] | Pico [dB] |
| Referencia  | 0.177   | 2.19      |
| 2 steps   | 0.177   | 2.37      |
| 6 steps   | 0.177   | 2.73      |
| 10 steps  | 0.177   | 3.11      |
| 20 steps  | 0.176   | 3.99      |
| 30 steps  | 0.175   | 5.07      |
| 40 steps  | 0.174   | 6.12      |
| 50 steps  | 0.173   | 7.23      |

Se observa que el valor del ancho de banda disminuye conforme aumenta el número de retrasos que se introducen en el sistema. Es decir, el sistema se va desplazando a la izquierda al añadirle retrasos. Esto provoca que el sistema reaccione **más lento** y, por tanto, siga peor la referencia de velocidad del generador.

A su vez, se aprecia que el pico es más elevado al añadir retrasos, por lo que el amortiguamiento es menor. Por tanto, cuantos más retrasos tenga el sistema, más va a oscilar a la frecuencia donde se encuentra el pico.

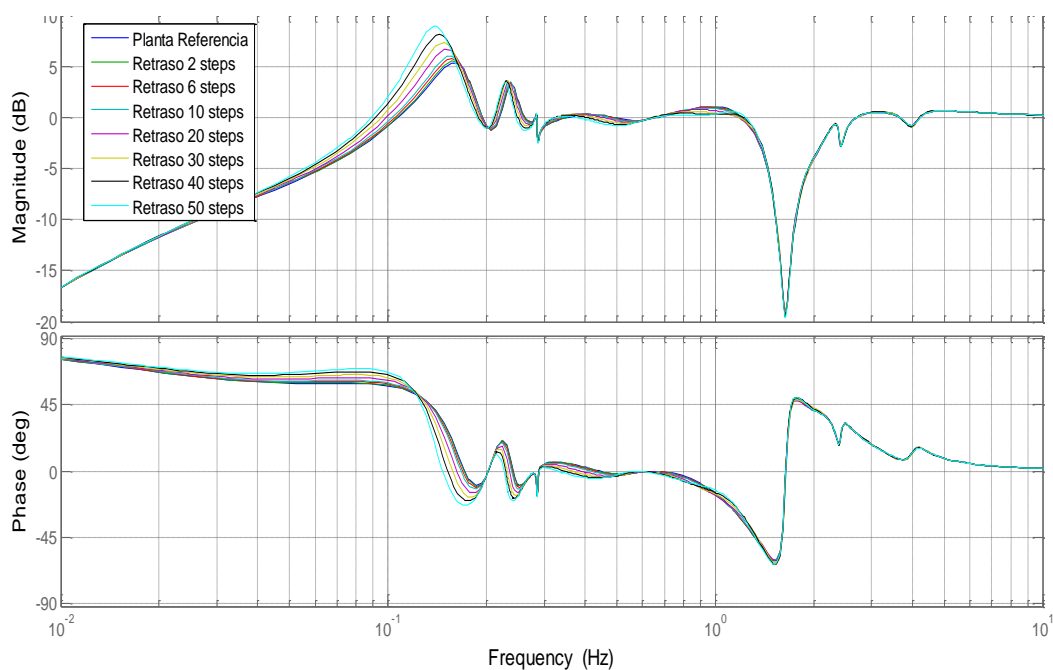


Fig. 76 Sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

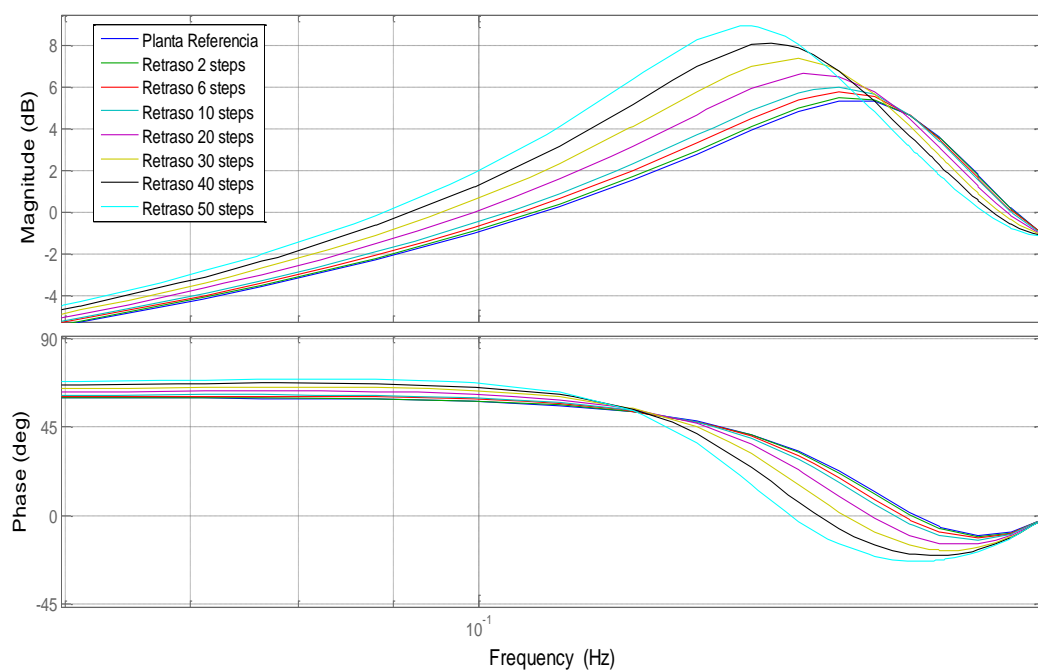


Fig. 77 Zoom sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

Tabla 17 Sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

| <b>Sensibilidad rechazo a perturbaciones del lazo de pitch<br/>(Punto de operación a 19 m/s)</b> |                |                  |
|--|----------------|------------------|
| <b>Retraso</b>   | <b>WB [Hz]</b> | <b>Pico [dB]</b> |
| <b>Referencia</b>  | 0.08114        | 5.34             |
| <b>2 steps</b>   | 0.08058        | 5.49             |
| <b>6 steps</b>   | 0.07963        | 5.77             |
| <b>10 steps</b>  | 0.07861        | 6.03             |
| <b>20 steps</b>  | 0.06960        | 6.66             |
| <b>30 steps</b>  | 0.07390        | 7.38             |
| <b>40 steps</b>  | 0.07178        | 8.14             |
| <b>50 steps</b>  | 0.06979        | 8.95             |

Se observa que el valor del ancho de banda disminuye conforme aumenta el número de retrasos que se introducen en el sistema. Es decir, el sistema se va desplazando a la izquierda al añadirle retrasos. Esto provoca que, ante perturbaciones externas, el sistema con un mayor número de retrasos sea más sensible, y por tanto, sea menos estable o robusto a dichas perturbaciones.

A su vez, se aprecia que el pico es más elevado al añadir retrasos, por lo que el amortiguamiento es menor. Por tanto, cuantos más retrasos tenga el sistema, más va a oscilar a la frecuencia donde se encuentra el pico.

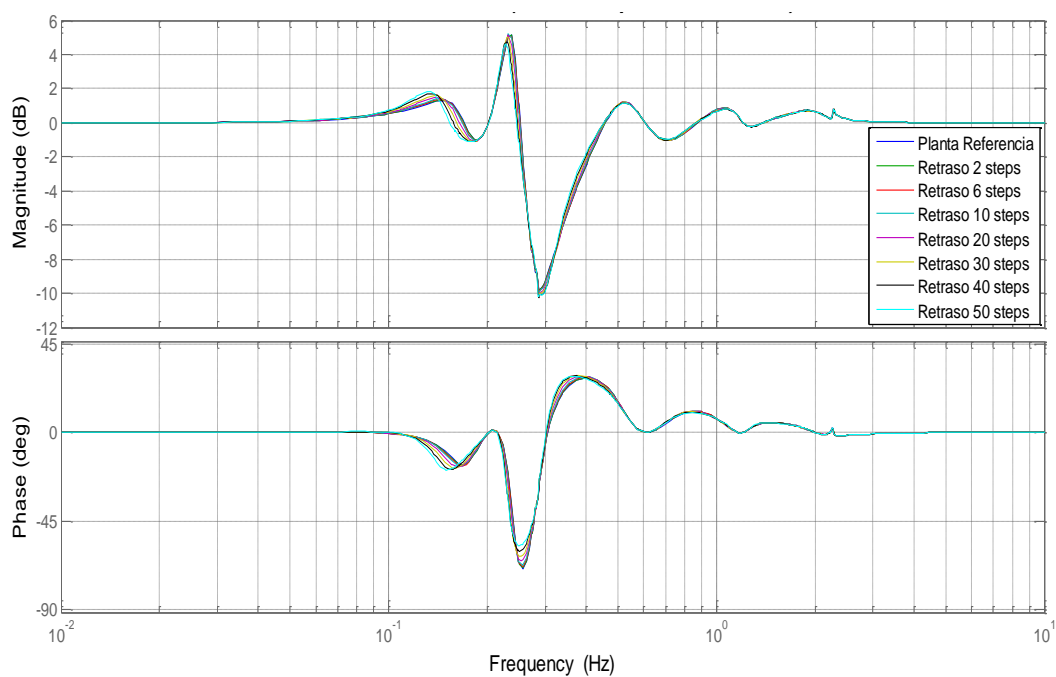


Fig. 78 Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 19 m/s)

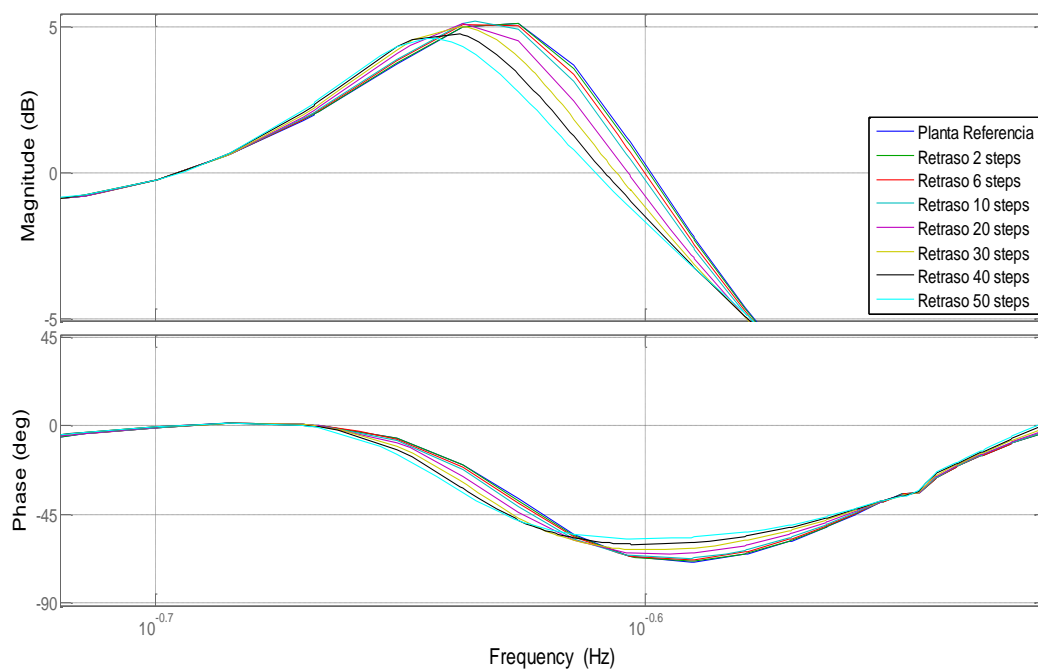


Fig. 79 Zoom sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 19 m/s)

Tabla 18 Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 19 m/s)

| Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD<br>(Punto de operación a 19 m/s) |         |           |
|--|---------|-----------|
| Retraso  | WB [dB] | Pico [dB] |
| Referencia   | 0.259   | 5.35      |
| 2 steps  | 0.259   | 5.32      |
| 6 steps  | 0.259   | 5.30      |
| 10 steps   | 0.258   | 5.25      |
| 20 steps   | 0.257   | 5.14      |
| 30 steps   | 0.257   | 5.03      |
| 40 steps   | 0.256   | 4.80      |
| 50 steps   | 0.256   | 4.61      |

Se observa que el valor del ancho de banda disminuye conforme aumenta el número de retrasos que se introducen en el sistema. Sin embargo, su variación es menor respecto a la sensibilidad del lazo de pitch. El hecho de este desplazamiento hacia la izquierda, provoca que, ante perturbaciones externas, el sistema con un mayor número de retrasos sea más sensible y, por tanto, sea menos estable o robusto a dichas perturbaciones.

Al contrario que en el caso de la sensibilidad del lazo de pitch, en el ATD, el pico va disminuyendo conforme aumenta el número de retrasos. Por tanto, se obtiene un mayor amortiguamiento provocando que el sistema oscile menos a la frecuencia donde se encuentra dicho pico.

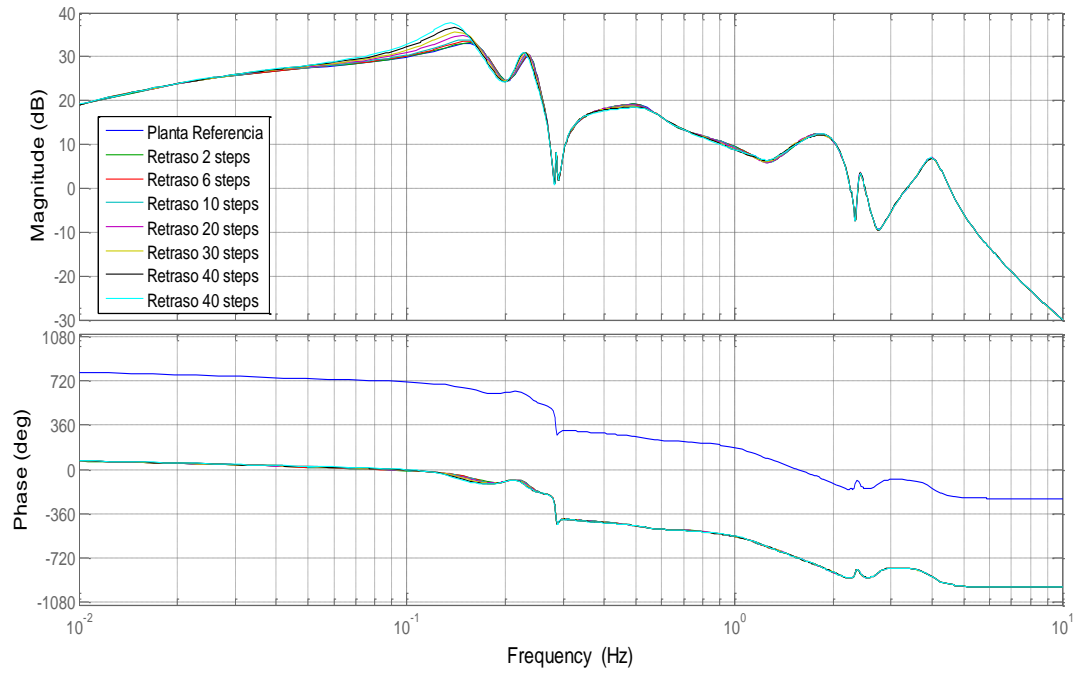


Fig. 80 Efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

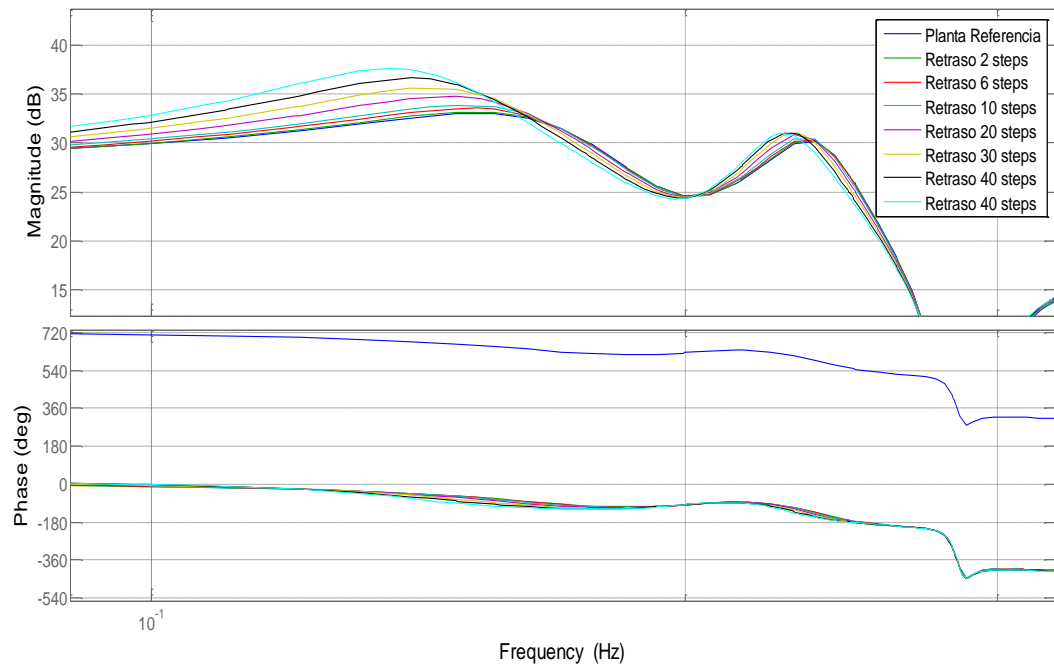


Fig. 81 Zoom efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)



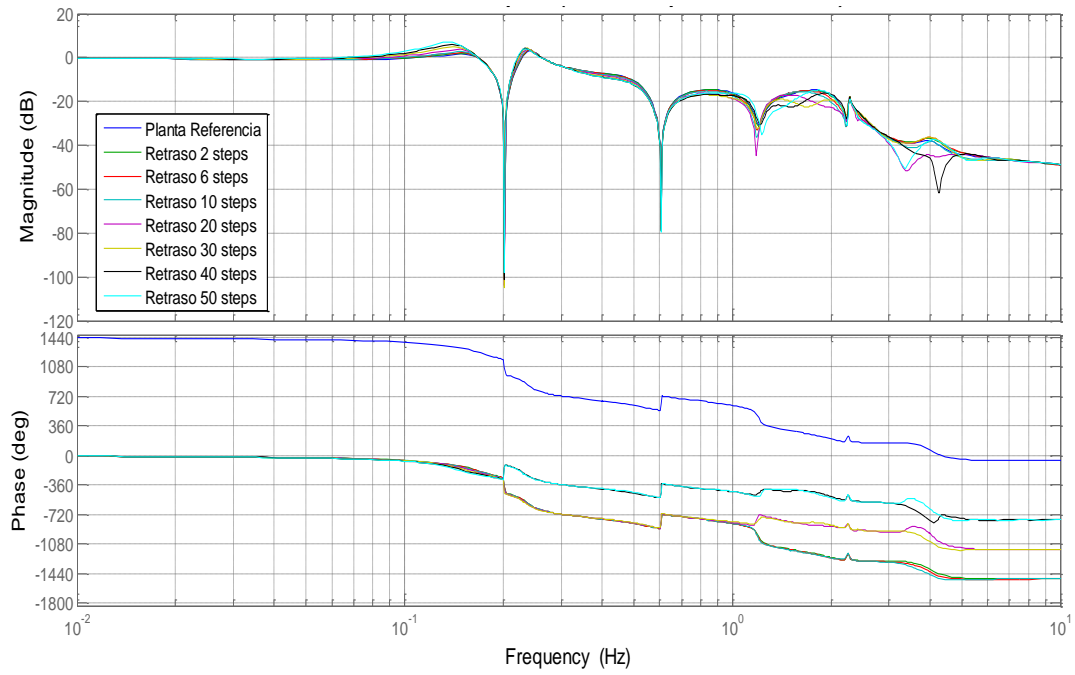


Fig. 82 Efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 19 m/s)

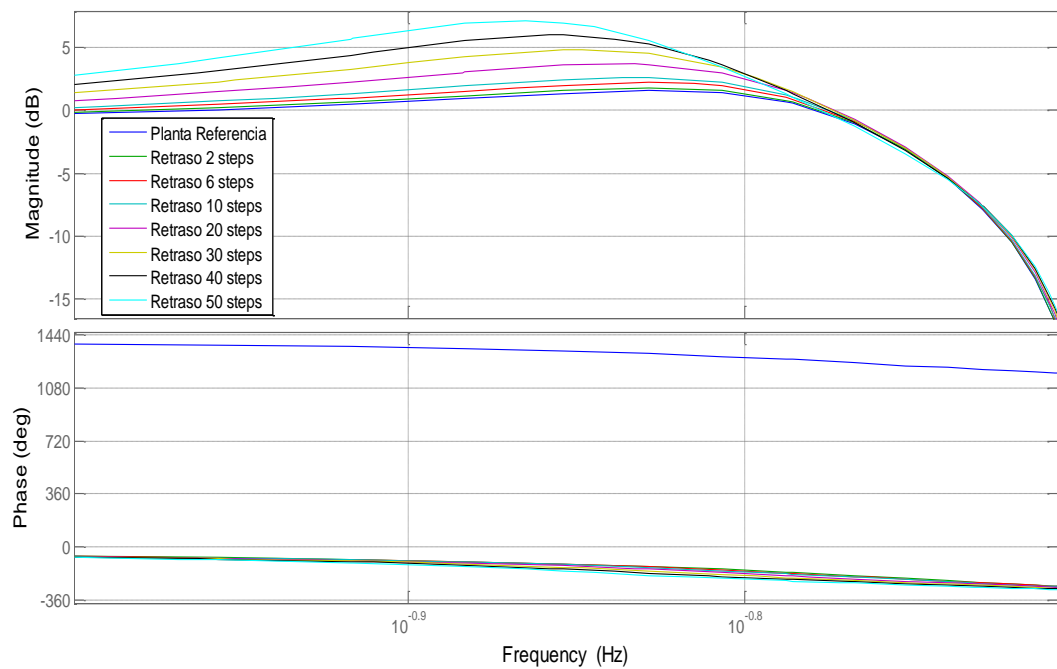


Fig. 83 Zoom efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 19 m/s)

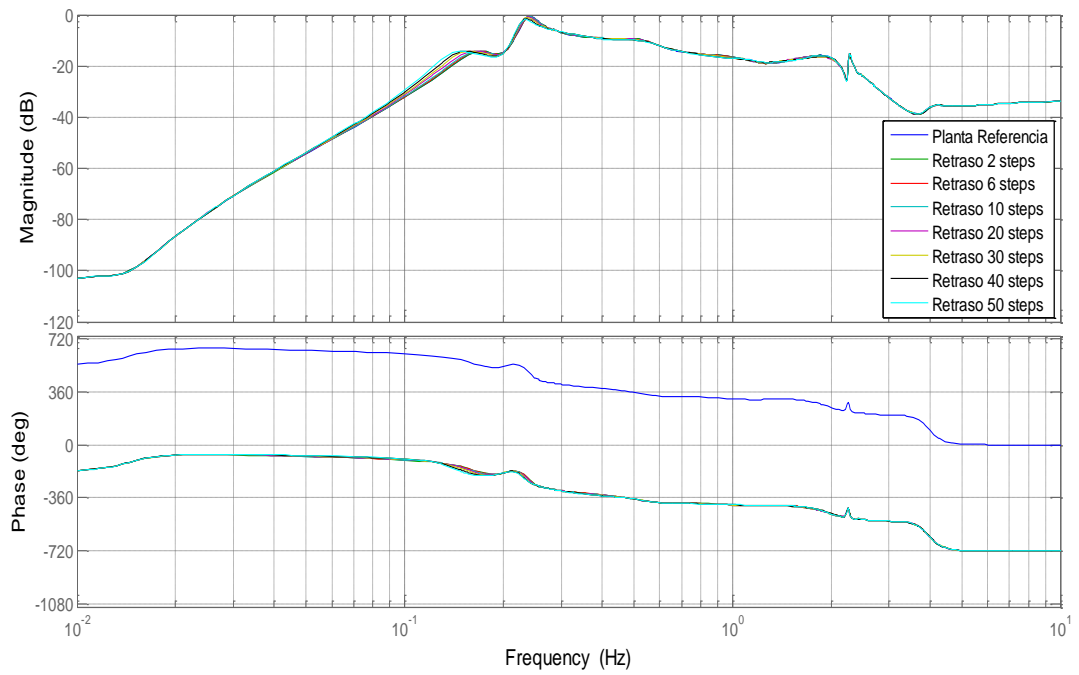


Fig. 84 Efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s)

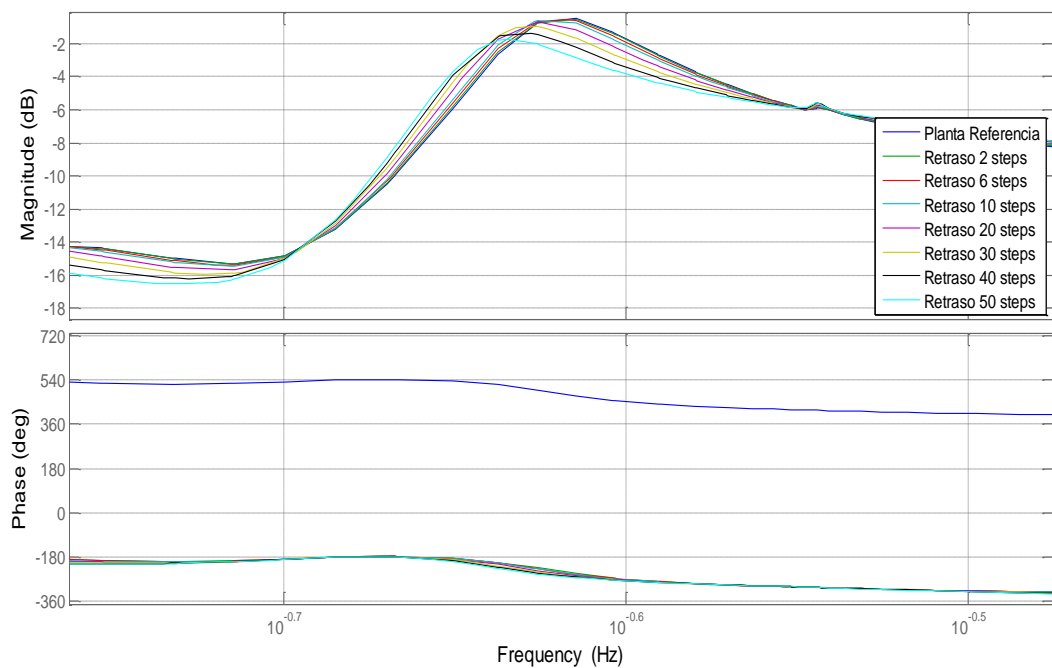
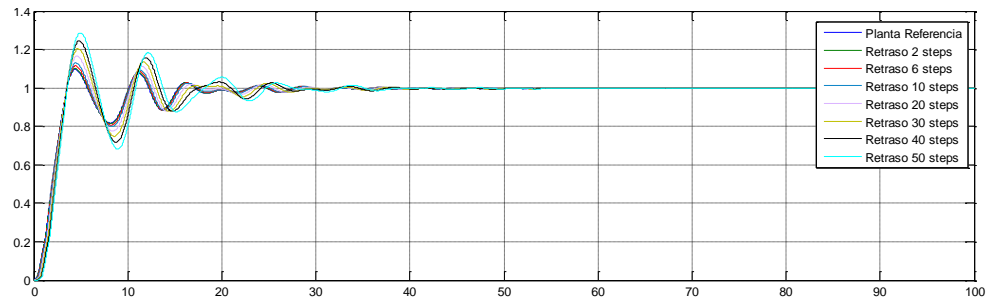
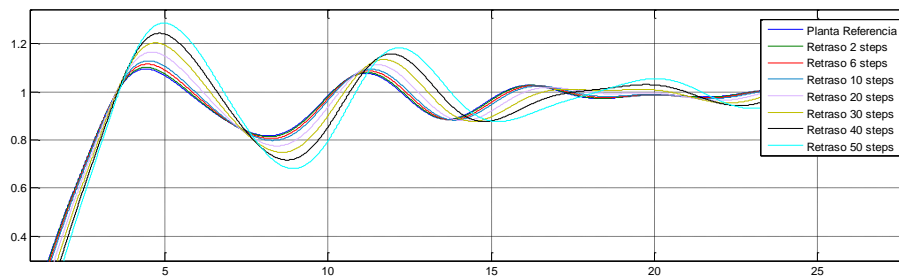


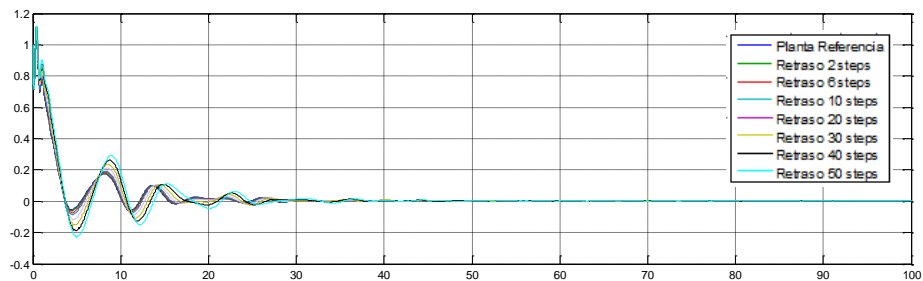
Fig. 85 Zoom efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s)



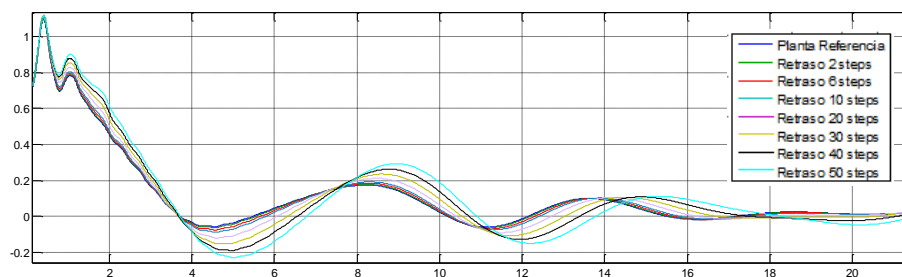
**Fig. 86** Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)



**Fig. 87** Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)



**Fig. 88** Respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)



**Fig. 89** Zoom respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

Tabla 19 Respuesta escalón sensibilidades del lazo de pitch (Punto de operación a 19 m/s)

| Respuesta escalón sensibilidades del lazo de pitch<br>(Punto de operación a 19 m/s) |                              |        |       |                          |        |
|---|------------------------------|--------|-------|--------------------------|--------|
|   | DE SEGUIMIENTO DE REFERENCIA |        |       | RECHAZO A PERTURBACIONES |        |
| Retraso   | Mp                           | Ts [s] | t [s] | Mp                       | Ts [s] |
| Referencia  | 1.10                         | 14.77  | 2.40  | 1.09                     | 14.75  |
| 2 steps   | 1.10                         | 14.82  | 2.40  | 1.10                     | 14.81  |
| 6 steps   | 1.12                         | 14.93  | 2.35  | 1.10                     | 14.92  |
| 10 steps  | 1.13                         | 15.04  | 2.36  | 1.11                     | 15.04  |
| 20 steps  | 1.17                         | 15.36  | 2.34  | 1.11                     | 15.38  |
| 30 steps  | 1.20                         | 15.74  | 2.28  | 1.12                     | 15.78  |
| 40 steps  | 1.24                         | 23.08  | 2.22  | 1.12                     | 22.98  |
| 50 steps  | 1.29                         | 23.77  | 2.18  | 1.12                     | 23.66  |

En cuanto a la sensibilidad de seguimiento de referencia, se observa cómo el sobreimpulso (Mp) aumenta conforme el número de retrasos es mayor. Lo mismo sucede con el tiempo de estabilización (Ts), lo cual coincide con lo que se ha visto anteriormente cuando se analizaba el ancho de banda. El tiempo de estabilización aumenta ya que el sistema es más lento con retrasos para seguir la referencia.

Se ve reflejada la misma situación en el caso de la sensibilidad de rechazo a perturbaciones. Cabe destacar que el sobreimpulso aumenta, pero en menor medida que en la sensibilidad de seguimiento de referencia. El tiempo de estabilización también aumenta conforme aumenta el número de retrasos, al tratarse de un sistema menos rápido.

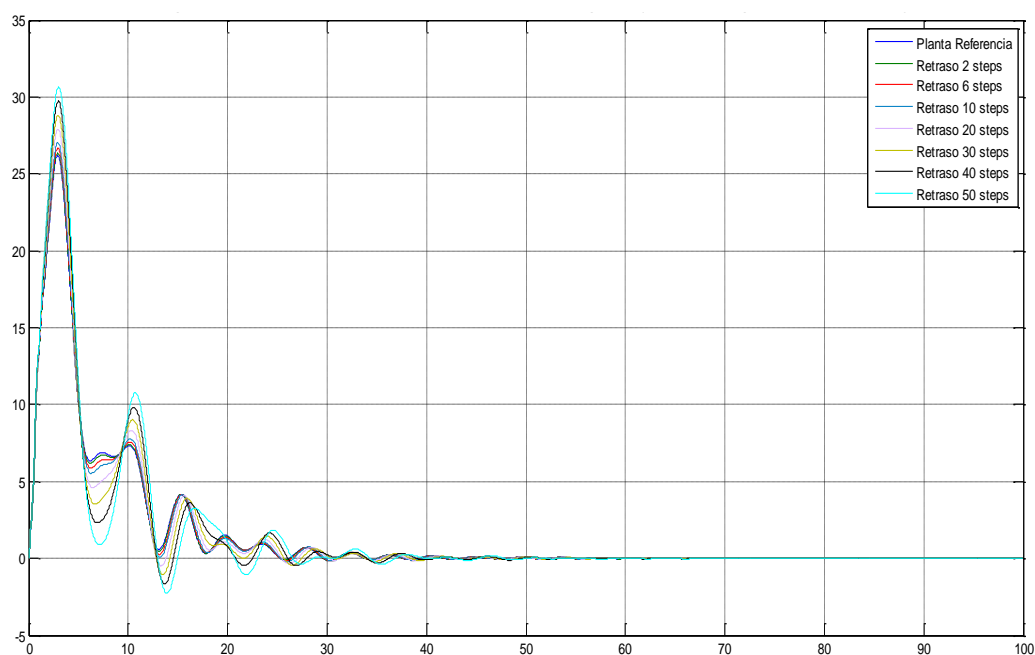


Fig. 90 Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

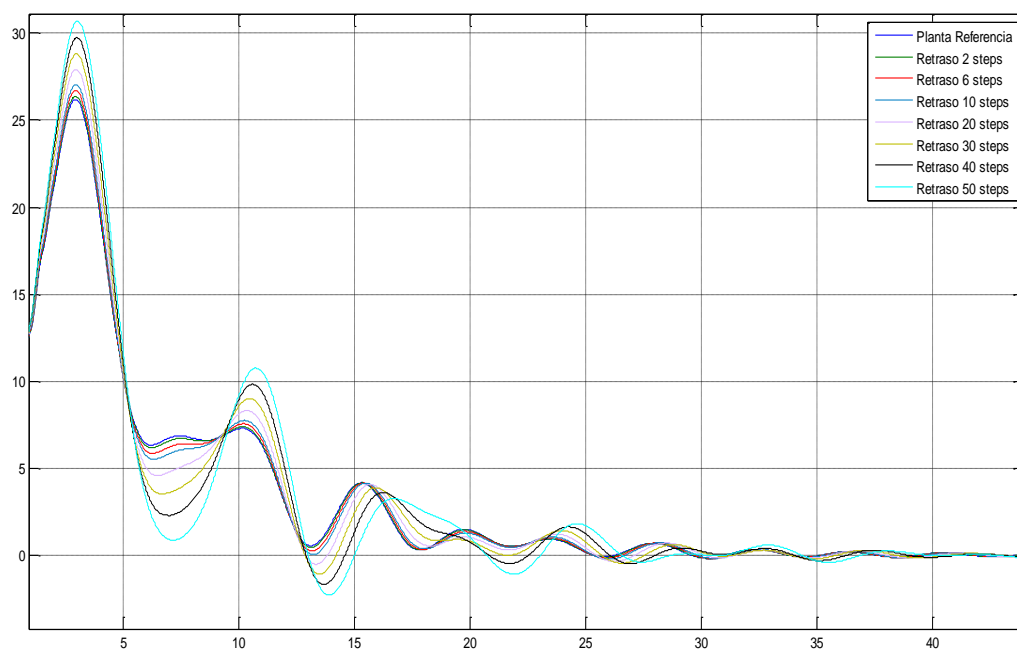


Fig. 91 Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

Tabla 20 Respuesta escalón efecto del viento en la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

| Respuesta escalón efecto del viento en la velocidad del generador<br>(Punto de operación a 19 m/s) |       |        |
|--|-------|--------|
| Retraso  | Mp    | Ts [s] |
| Referencia   | 26.19 | 53.77  |
| 2 steps  | 26.36 | 53.85  |
| 6 steps  | 26.70 | 54.02  |
| 10 steps   | 27.04 | 54.16  |
| 20 steps   | 27.91 | 54.44  |
| 30 steps   | 28.81 | 54.49  |
| 40 steps   | 29.74 | 51.25  |
| 50 steps   | 30.68 | 51.04  |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído de las respuestas escalón de las sensibilidades del lazo de pitch.

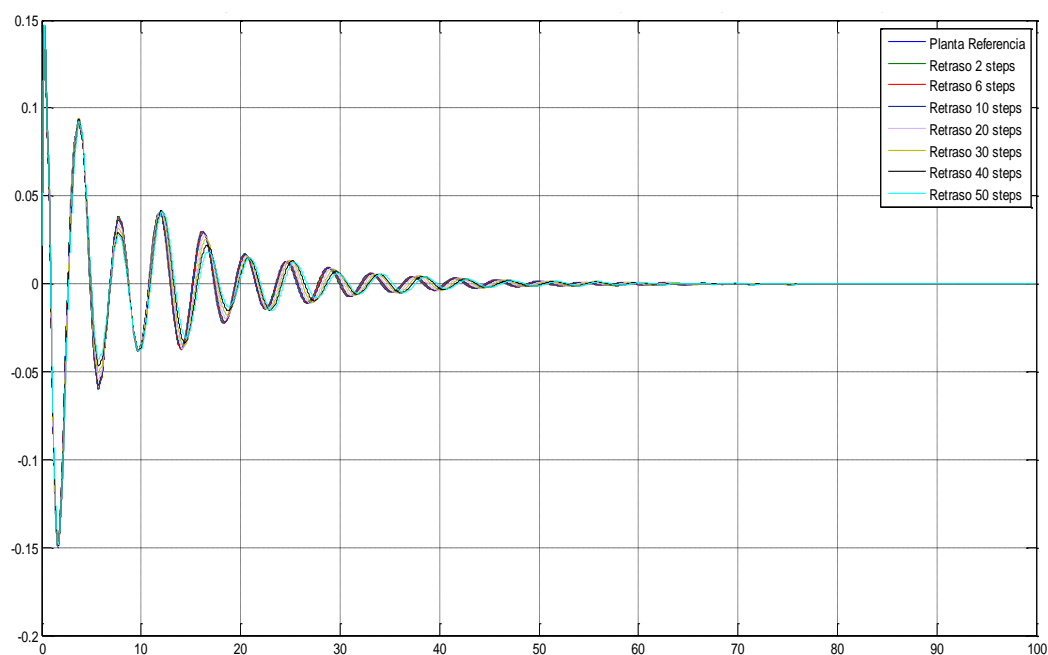


Fig. 92 Respuesta escalón efecto del viento sobre aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s)

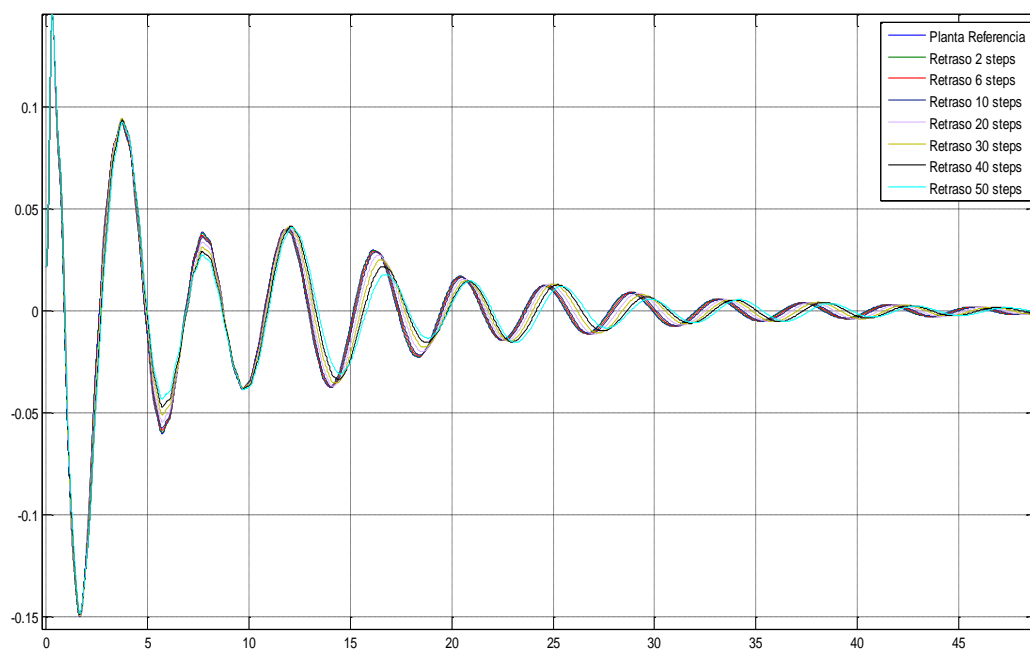


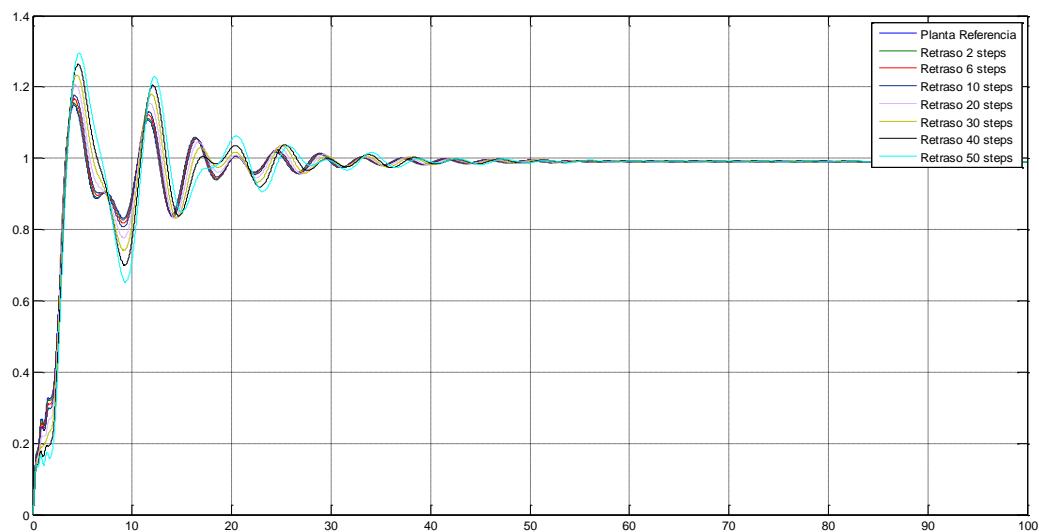
Fig. 93 Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre aceleración de la torre (Punto de operación a 19m/s)

Tabla 21 Respuesta escalón efecto del viento en la aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s)

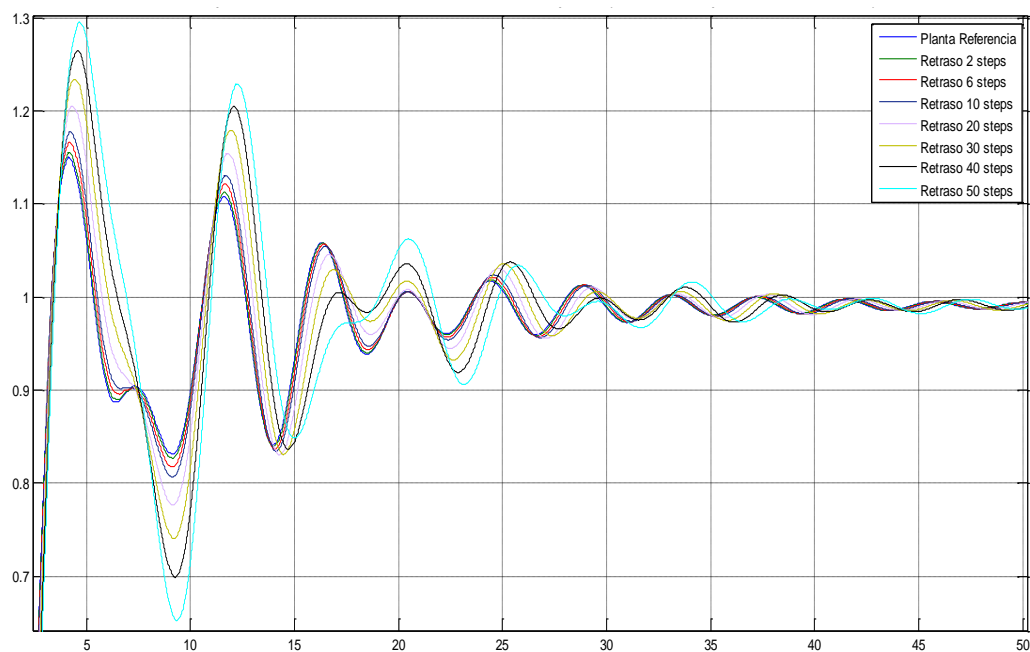
| Respuesta escalón efecto del viento en la aceleración de la torre<br>(Punto de operación a 19 m/s) |        |        |
|--|--------|--------|
| Retraso  | Mp     | Ts [s] |
| Referencia   | 0.1466 | 6.143  |
| 2 steps  | 0.1468 | 6.139  |
| 6 steps  | 0.1470 | 6.131  |
| 10 steps   | 0.1471 | 6.120  |
| 20 steps   | 0.1473 | 6.043  |
| 30 steps   | 0.1473 | 5.808  |
| 40 steps   | 0.1473 | 4.523  |
| 50 steps   | 0.1473 | 4.511  |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído de las respuestas escalón de las sensibilidades del lazo de pitch.





**Fig. 94** Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación 19 m/s)



**Fig. 95** Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación 19 m/s)

Tabla 22 Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 19 m/s)

| Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch<br>(Punto de operación a 19 m/s) |      |        |
|---|------|--------|
| Retraso   | Mp   | Ts [s] |
| Referencia  | 1.15 | 18.98  |
| 2 steps   | 1.16 | 18.97  |
| 6 steps   | 1.17 | 18.93  |
| 10 steps  | 1.18 | 18.82  |
| 20 steps  | 1.21 | 22.88  |
| 30 steps  | 1.23 | 23.30  |
| 40 steps  | 1.27 | 23.71  |
| 50 steps  | 1.30 | 24.13  |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído de las respuestas escalón de las sensibilidades del lazo de pitch.

En definitiva, en todos los casos, da igual dónde nos encontremos los retrasos que hacen que el **pico aumente** y el **ancho de banda disminuye** haciendo el controlador **más lento**. Además, el **sobre impulso por tanto es mayor**, así como el **tiempo de estabilización**.

## 7. CÓDIGO FUENTE DEL CONTROLADOR

La estrategia de control que se ha empleado es la realizada por Asier Díaz de Corcuera para su tesis descrita en [3] y es la que usa como referencia para realizar las diferentes comparaciones de otras estrategias de control. Una de las tareas que se han llevado a cabo es la comprensión del código y de cómo está estructurado para poder introducir los distintos retrasos y mejoras en la estrategia de control.

### 7.1 Explicación del código fuente del control de referencia

Se trata de un controlador desarrollado en **código C** el cual se compila utilizando **Visual Studio**. Una vez compilado se obtiene una librería con el nombre DISCON.dll donde se encuentra la estrategia de control compilada.

La estrategia de control está dividida en cuatro pasos con el objetivo de tener un diseño de cuatro controladores SISO (una entrada y una salida):

- Diseño del filtro de amortiguamiento del tren de potencia (DTD).
- Diseño del control de la velocidad del generador en la zona de transición usando un control de par.
- Diseño del control de la velocidad del generador en la zona de por encima de la nominal utilizando un control de pitch colectivo.
- Diseño del filtro de amortiguamiento del movimiento fore-aft de la torre (ATD).

Cabe destacar que los cuatro diseños anteriores están realizados en matrices de estados y son discretizados con un tiempo de muestreo de 0.01 segundos, valor común en la industria.

A continuación, se va a detallar cómo se han introducido los diferentes retrasos que se han tenido en cuenta en el estudio.

### 7.2 Inclusión de los retrasos en el código fuente

Para incluir los retrasos en el controlador hay que entender cómo se produce durante las simulaciones las llamadas desde FAST a dicho controlador. Esta llamada se produce cada 0.01 segundos, lo cual equivale al tiempo de muestreo.

Cada vez que se llama a la **librería dll** del controlador se ejecuta teniendo en cuenta las distintas variables que se miden desde el mismo FAST. Con dicha lectura, se sabe en qué condiciones de trabajo se encuentra el aerogenerador y, a partir de ahí, se decide la estrategia de control que se vaya a llevar a cabo en función en qué punto de operación se encuentre.

El código está dividido en diferentes archivos fuente (.cpp) y archivos encabezado (.h). Dentro de los archivos fuente, hay uno que es el principal, el Main\_Controller.cpp. Este

archivo contiene la estructura principal de toda la estrategia de control y desde este archivo se va llamando a las diferentes funciones, como por ejemplo el control de pitch, las cuales están contenidas cada una en su documento correspondiente.

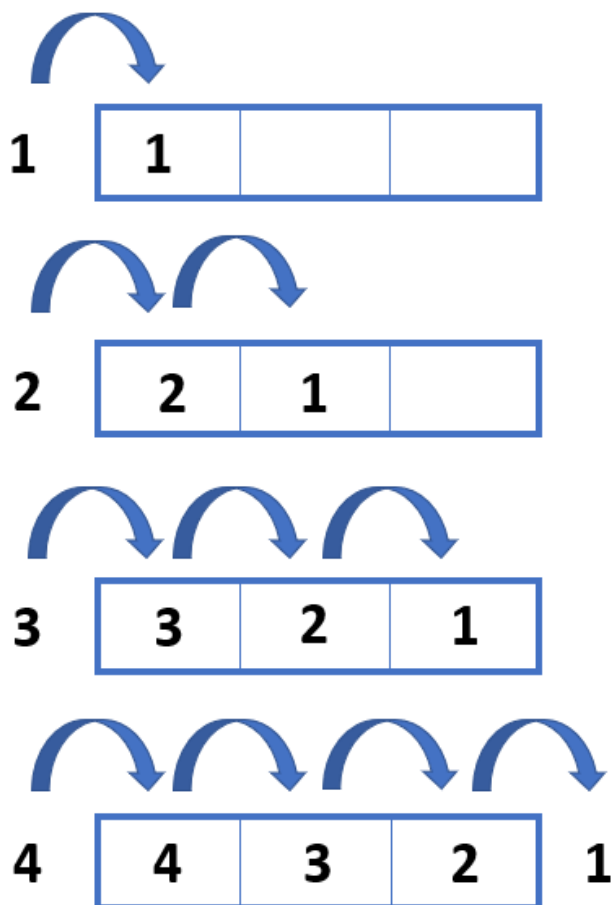


Fig. 96 Esquema ejemplo de cómo se generan los retrasos

Por tanto, para introducir los retrasos primero hay que localizar dentro del código fuente la variable que se quiere retrasar y la posición en el sistema de la misma. A continuación, hay que generar un vector donde se almacene la variable que se desee retrasar. Este vector, tendrá tantos espacios de almacenamiento como retrasos se quieran incluir. Cada vez que se llame al controlador el nuevo valor de la variable se irá almacenando en el vector y los anteriores valores irán avanzando un espacio dentro del vector. De esta manera, cuando lleguen a la posición inicial del vector el valor de la variable sale del vector y es el nuevo valor de la variable ya retrasada.

En la fig. 96 se muestra de manera esquemática el proceso de introducir los retrasos. En este caso, se realiza un retraso de 4 steps.

Se ve como en el primer paso llega el primer valor de la variable a retrasar y se coloca en el primer espacio del vector.

En el segundo paso, el valor de la variable que ocupaba el primer espacio para a ocupar el segundo hueco y el segundo valor de la variable pasa a ocupar su lugar dentro del vector. De manera análoga ocurre en el tercer paso.

Por último, en el cuarto paso, el valor de la variable que había llegado en primer lugar, sale del vector y éste será el valor que tome la variable siendo el de cuatro muestras anteriores. Este proceso se da sucesivamente durante toda la simulación.

Además, en este proyecto no sólo se han tenido en cuenta **retrasos con un valor conocido**, sino que también se han simulado **retrasos aleatorios**. Para ello, se han generado números aleatorios entre 0 y 1 y en función del número que obtenido se generan unos retrasos u otros. Para que no en todas las simulaciones este número

aleatorio fuese el mismo, la semilla inicial varía en función de la hora del ordenador. La forma de programar dicha acción es la siguiente:

```
double numero_aleatorio;
using namespace std;
int main(void);
{
double numero_aleat;
numero_aleat=(rand()%101); //se genera un número aleatorio entre 0 y 100
numero_aleatorio=numero_aleat/100; // se genera un número aleatorio entre 0 y 1
};
```

Cabe destacar, que es necesario obtener una librería DISCON.dll para cada uno de los retrasos que se quieran simular.

Para incluir los retrasos en la lectura de la velocidad del aerogenerador, se realiza el proceso anteriormente explicado sobre la variable **rMeasuredGenSpeed** del código fuente. Se realiza prácticamente al principio del código del archivo fuente Main\_Controller.cpp, justamente después de donde se leen las variables desde FAST, una vez que la dll ha sido llamada correctamente.

Mientras que para introducir los retrasos en la demanda del pitch la variable a retrasar es **rDemandedPitch**, una vez que se ha sumado el pitch demandado por el ATD (Pitch\_TD) y el pitch demandado por el controlador (U\_Pitch). Se puede encontrar prácticamente al final del archivo Main\_Controller.cpp, justo antes de introducir el valor de las variables a los diferentes canales de FAST.

## 8. PROPUESTAS DE MEJORA DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

En este apartado se van a proponer diferentes mejoras para la estrategia de control analizada en el documento Trabajo Fin de Máster “Modelado de incertidumbre en sistema de comunicaciones de un aerogenerador y diseño de algoritmos de control inmunes a sus efectos”. Además, se va a mostrar los diferentes resultados obtenidos y se explica la importancia de dichas mejoras.

En este documento se presentan los resultados obtenidos gracias a las propuestas de mejora dentro del área de control. La validación de los resultados de **estudios a fatiga** se puede encontrar en el **Trabajo Complemento de Trabajo Fin de Máster** “Simulación mecánica de incertidumbre en sistema de comunicaciones y actuadores de un aerogenerador”.

### 8.1 Propuesta de mejora 1: limitación de pitch

Cabe destacar que esta mejora más que una mejora es una corrección que hay que hacer al controlador ya que es estrictamente necesario tener una limitación de pitch. A continuación, se explica el motivo de la mejora 1, así como su explicación.

#### 8.1.1 Motivo de la mejora 1

Al realizar una simulación con un viento que va desde 3 m/s a 25, tal y como se muestra en la fig.97, se observa que el pitch no tiene limitación alguna y que puede modificar su ángulo tan rápido como sea necesario. Estos cambios bruscos y rápidos se muestran en la fig. 98.

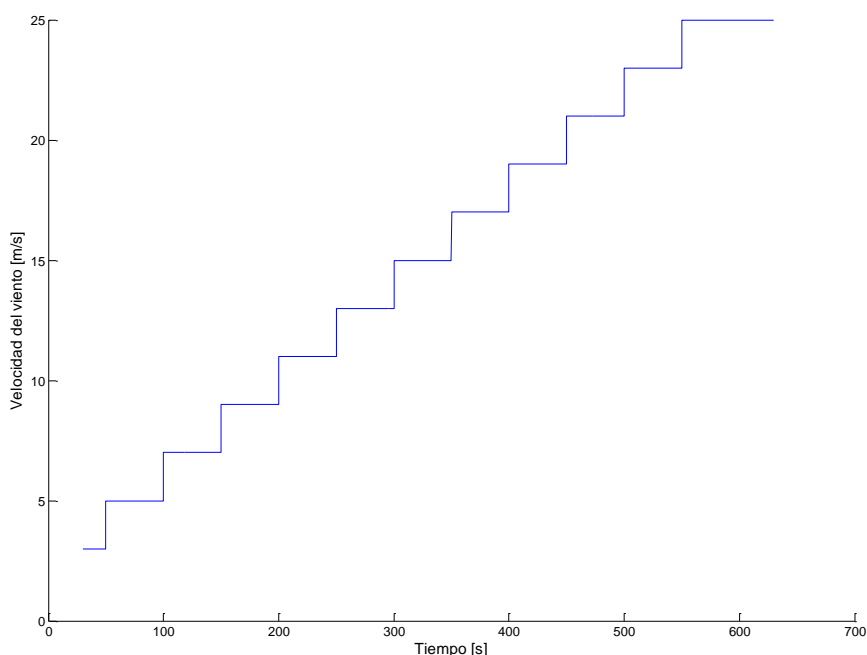


Fig. 97 Velocidad de viento respecto del tiempo empleado en las simulaciones

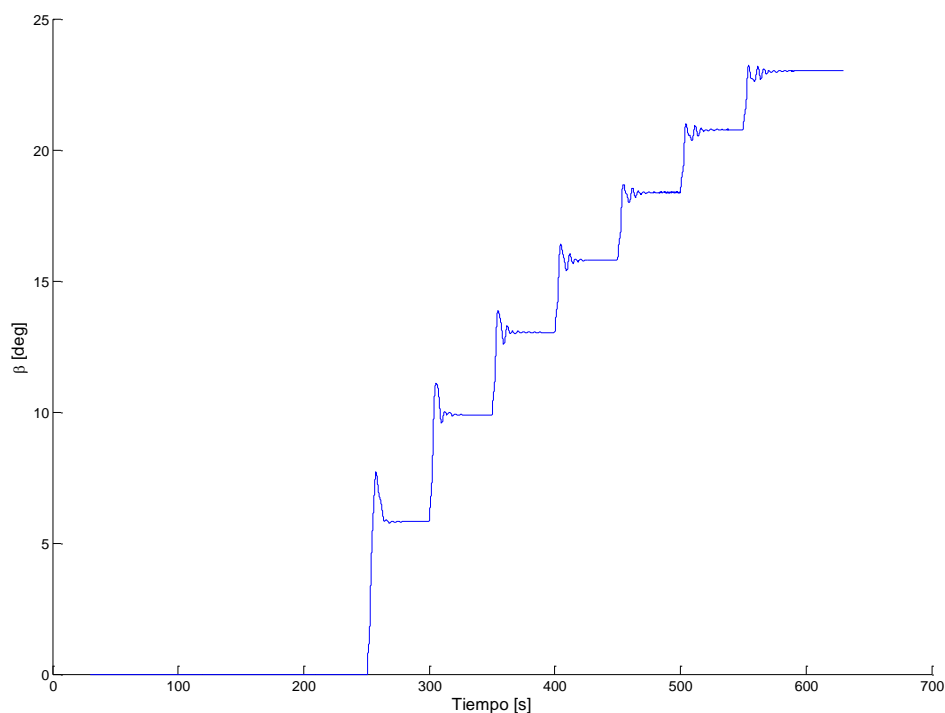


Fig. 98 Pitch respecto del tiempo del control de referencia en simulación

En la realidad esto no puede suceder así, ya que el movimiento mecánico del pitch está limitado debido a que es físicamente imposible modificar todo lo que se desee de manera instantánea. Además, resultaría inviable para el mantenimiento de la estructura y reduciría de forma considerable la vida útil del aerogenerador.

### 8.1.2 Explicación de la mejora 1

Por ello, la primera mejora que se propone es limitar los grados de pitch que avanza por segundo. Se hace que el ángulo máximo de pitch que puede modificar sea de **7 grados por segundo**. Con estos 7 grados por segundo se consigue un control óptimo de la máxima potencia sin permitir que la vida útil de la máquina se vea reducida.

En torno, a este rango de velocidad angular es el que se suele poner dentro del ámbito industrial de los aerogeneradores.

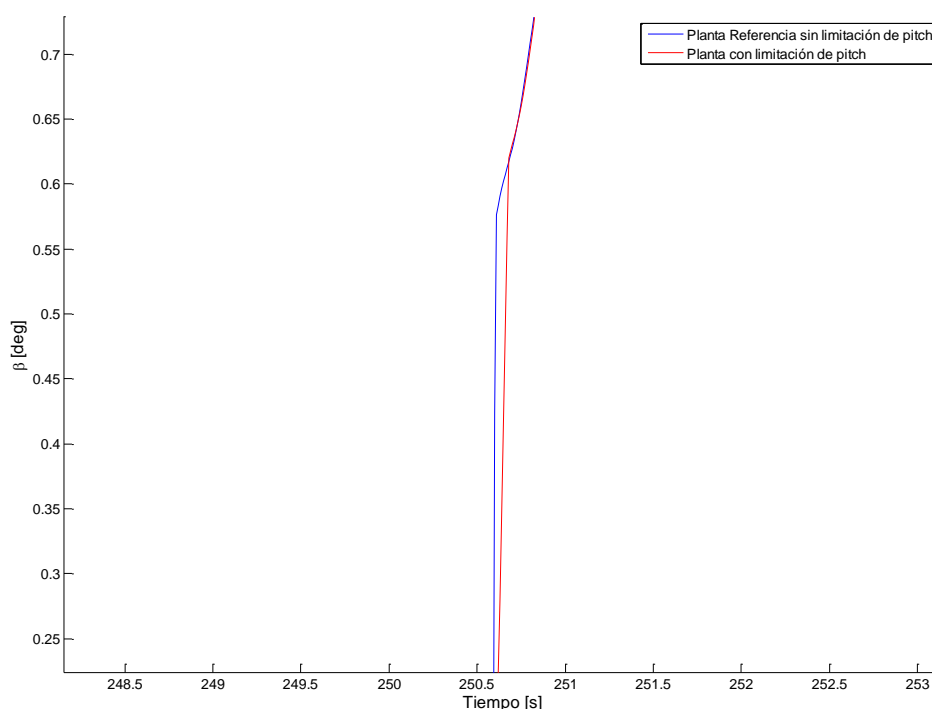


Fig. 99 Comparación del pitch respecto del tiempo de la planta de referencia y de la planta con limitación de pitch

Tal y como se observa en la fig. 99, se aprecia cómo el ángulo de pitch va modificándose más lento una vez que se le ha introducido la limitación de pitch.

## 8.2 Propuesta de mejora 2: filtro Lead-Lag

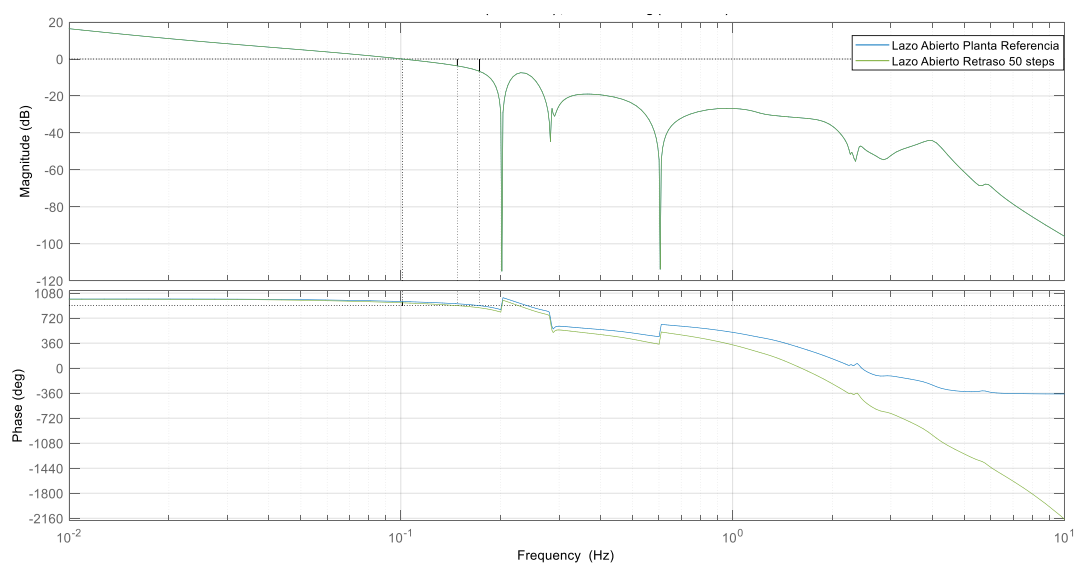
A continuación, se detalla el motivo de la mejora, así como su explicación. Además, se muestra cómo se ha realizado la inclusión de la misma en el modelo lineal a través del software **MATLAB** y su programación en el código fuente del controlador.

En el Capítulo 9 se muestran los diferentes resultados y comparaciones.

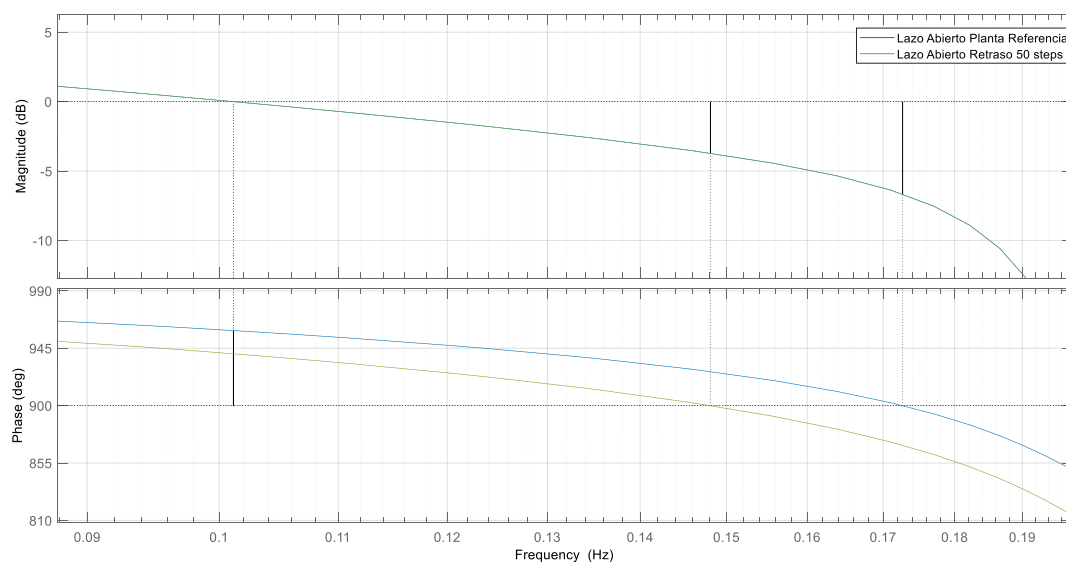
### 8.2.1 Motivo de la mejora 2

El estudio se centra en la adición de retrasos en el pitch demandado. Al realizar el análisis y observar las diferencias del modelo lineal en lazo abierto con y sin retrasos en dicho punto, se observa que los márgenes de estabilidad descienden considerablemente. Se muestra el comportamiento del lazo abierto sin retrasos y con un **retraso de 50 steps** en el **punto de operación a 19 m/s** en la fig. 100. En este caso, se estudia sobre el retraso de 50 steps por ser el más desfavorable.





**Fig. 100 Comparación diagrama de bode del lazo abierto de la referencia y con un retraso de 50 steps**



**Fig. 101 Zoom comparación diagrama de bode del lazo abierto de la referencia y con un retraso de 50 steps**

**Tabla 23 Comparación márgenes de estabilidad de la referencia y con un retraso de 50 steps**

| Comparación márgenes de estabilidad del Lazo Abierto |                              |                           |
|--|------------------------------|---------------------------|
| Sistema  | Margen de ganancia (MG) [dB] | Margen de fase (MF) [deg] |
| Planta Referencia                                    | 6.66                         | 58.80                     |
| Retraso 50 Steps                                     | 3.72                         | 40.60                     |

Puede apreciarse cómo ambos márgenes de estabilidad, margen de ganancia y de fase, descienden con la adición de retrasos. En la industria suelen tomarse unos valores de margen de ganancia mayor de 6 dB y margen de fase mayor que 30 deg. Puede verse, que el margen de ganancia no cumple dicho requisito mínimo. Además, sería recomendable que el margen de fase fuese superior.

Por ello, se propone añadir un **filtro Lead-Lag** en serie con los filtros de pitch y con el controlador de pitch para **ganar márgenes de estabilidad y compensar la fase** que se pierde con la inclusión de los retrasos.

### 8.2.2 Explicación teórica Lead-Lag

Un **compensador Lead-Lag** mejora la respuesta en frecuencia no deseada en un sistema de control.

La compensación de adelante (lead), acelera la respuesta del sistema e incrementa la estabilidad del sistema. La compensación de retardo mejora la precisión en estado estacionario del sistema, pero reduce la velocidad de respuesta.

Por tanto, para mejorar tanto la respuesta transitoria como la respuesta en estado estacionario se deben utilizar de manera simultánea ambos.

El lead-lag introduce un par de polos y ceros en el lazo abierto de la función de transferencia.

$$\frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{s - z}{s - p}$$

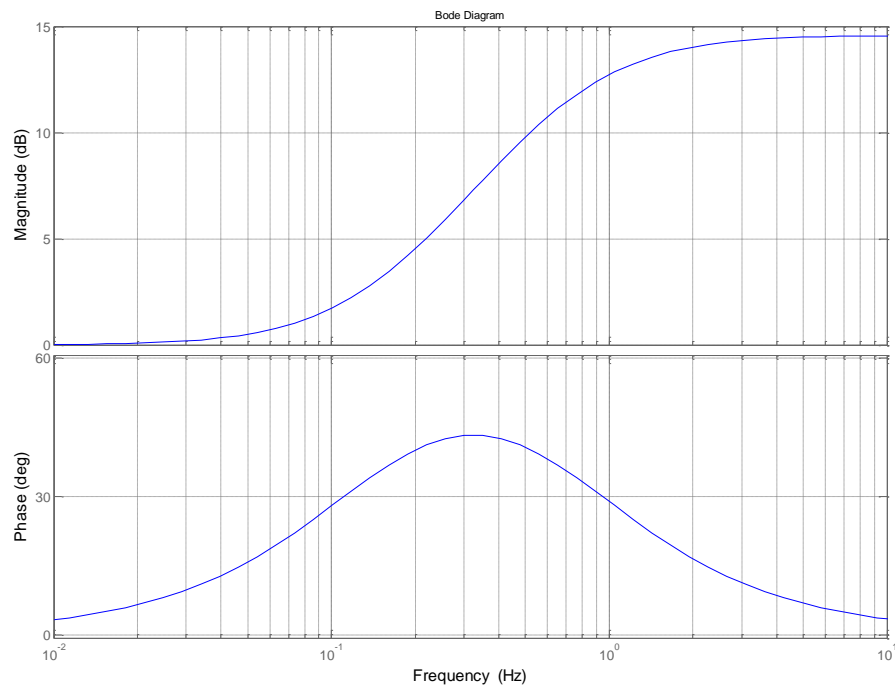
$$\frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{(s - z_1)(s - z_2)}{(s - p_1)(s - p_2)}$$

El compensador por adelanto proporciona un **adelanto de fase a altas frecuencias**. Es decir, mueve el lugar de las raíces hacia la izquierda haciendo que el sistema sea más rápido y estable.

El compensador por retraso proporciona un **retraso en fase a bajas frecuencias**. Es decir, reduce el error.

### 8.2.3 Introducción de la mejora 2 en el modelo lineal

El diagrama de bode del Lead-Lag que se ha propuesto como mejora 2, puede verse en la fig. 102.



**Fig. 102 Diagrama de bode del Lead – Lag**

Además, tal y como se ha visto en análisis de cómo afecta la inclusión de retrasos en el sistema, conforme aumenta el número de retrasos, el pico cada vez es mayor. Por ello, se añade una ganancia en serie para reducir dicho pico. Cabe destacar que con dicha ganancia no solo se baja el pico, sino que se baja todo el espectro de frecuencia. En la fig. 91, se muestra el Lead – Lag con una ganancia en serie de valor 0.75 que es la que se va a utilizar.

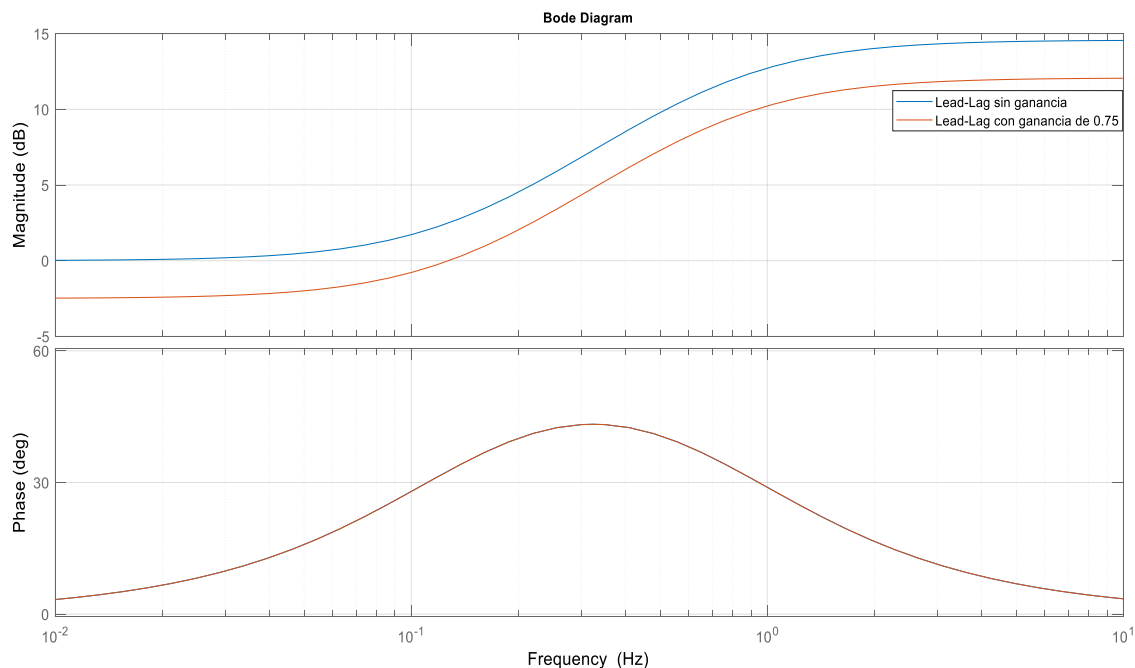


Fig. 103 Diagrama de bode del Lead-Lag sin ganancia y con ganancia

El Lead – Lag junto con la ganancia, se introducen en serie a los filtros de pitch y el control de pitch. Es decir, justo después de que se calcula el error existente en la velocidad del generador una vez filtrada por los filtros de pitch. En la fig. 104 se muestra cómo queda el nuevo sistema de control con la mejora 2 introducida.

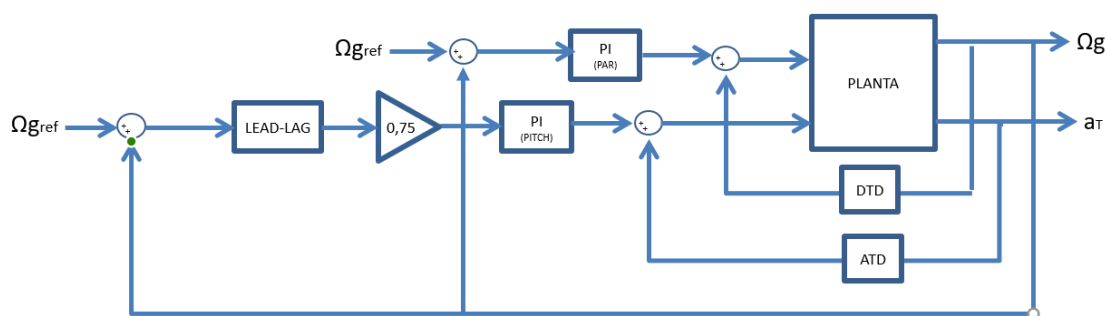


Fig. 104 Esquema del nuevo sistema de la estrategia de control con la mejora 2

#### 8.2.4 Introducción de la mejora 2 en el código fuente del control

Una vez que se tiene el filtro Lead-Lag diseñado en continuo, para poder programarlo es necesario primero discretizarlo y finalmente pasarlo al sistema de programación.

Para realizar el primero de los pasos, la discretización, se ha empleado la herramienta MATLAB, utilizando la función c2d mediante el método de “tustin” y con un **tiempo de discretización igual a 0.01 segundos**. Es necesario que el tiempo de discretización coincida con el tiempo de muestreo. El comando para ejecutarlo sería el siguiente:

```
c2d(leadlag_2,0.01,'tustin')
```

Una vez que se tiene ya discretizado, es necesario su conversión al lenguaje de programación para poder introducirlo en el código fuente del control. De esta manera, la salida del Lead-Lag diseñado depende de su entrada actual, entrada anterior y salida anterior. A continuación, se multiplica la salida obtenida del filtro Lead-Lag por la ganancia de 0.75 la cual pasará a ser la salida de la mejora 2.

La manera que se ha introducido el Lead-Lag dentro del código fuente es mediante la creación de un archivo fuente llamado leadlag\_FT.cpp, el cual es llamado desde el Main\_Controller.cpp para su ejecución. Para que se produzca la llamada, una vez que se genera la señal del error de la velocidad del generador filtrada, se iguala al archivo leadlag\_FT.cpp de la siguiente manera:

```
StrVariables.Error_WG_Filt_act = leadlag_FT (&StrVariables)
```

Donde dentro del archivo leadlag\_FT se encuentra programada la función de transferencia del filtro Lead-Lag y su correspondiente multiplicación posterior por la ganancia, cuya salida pasa a ser nuestro nuevo valor de la variable error de la velocidad del generador filtrada.

### 8.2.5 Validación de la correcta inclusión de la mejora 2

Una vez que se ha introducido la mejora 2, se procede a su **validación**. Para ello, se compara 5 modelos entre sí, para dar como válido la mejora 2 dentro del código fuente. Para poder extraer la entrada y salida del filtro Lead – Lag para su comprobación es necesario la creación de un archivo de texto desde el propio código donde se almacenen dichas variables. El código para la creación de dicho archivo de texto es el siguiente:

```
FILE *ptr_fichero; //Función que genera el archivo de texto
ptr_fichero=fopen("jaione_control.txt","a"); //Función que abre el archivo
de texto y lo crea con un nombre
fprintf(ptr_fichero, "%f \t %f \t %f \n", StrVariables.rCurrentTime,
StrVariables.mejora.entrada_ant, StrVariables.mejora.salida_ant);
//Función que escribe en el archivo de texto. En este caso interesa el
tiempo, la entrada al filtro Lead – Lag y su salida.

fclose(ptr_fichero); //Función que cierra el archivo de texto
```

Cada una de las líneas de programación anteriores tiene que ir en la ubicación correspondiente dentro del código fuente.

Estos **5 modelos** son:

- 1) Datos de salida del filtro Lead – Lag introducido en el código fuente multiplicados por una ganancia de 0.75.
- 2) Datos de entrada del código fuente en serie con una ganancia de 0.75 y con el filtro Lead – Lag programado desde Matlab. El Lead – Lag está programado en continuo y se ordena desde el bloque de Simulink su discretización.
- 3) Datos de entrada del código fuente en serie con una ganancia de 0.75 y con la función de transferencia discretizada para la comprobación de los decimales.
- 4) Ecuación del filtro Lead – Lag programada en el código fuente realizada por medio de bloques en SIMULINK.
- 5) Datos de entrada en el código fuente.

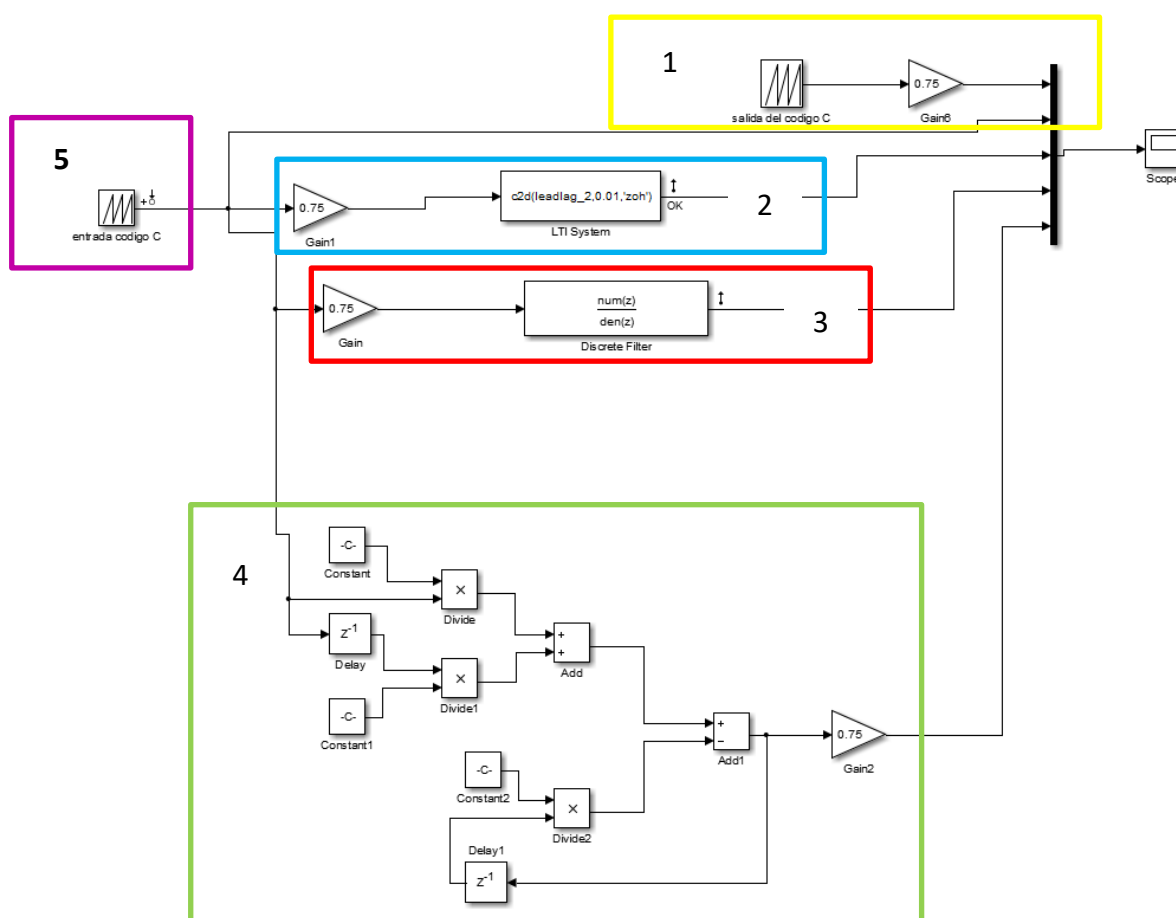
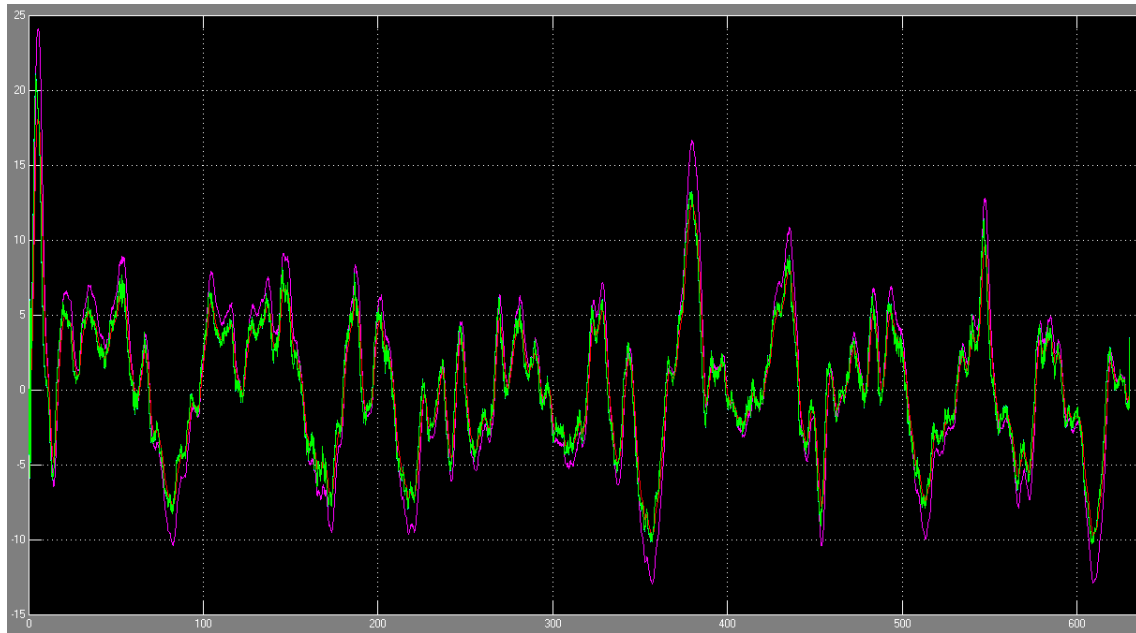
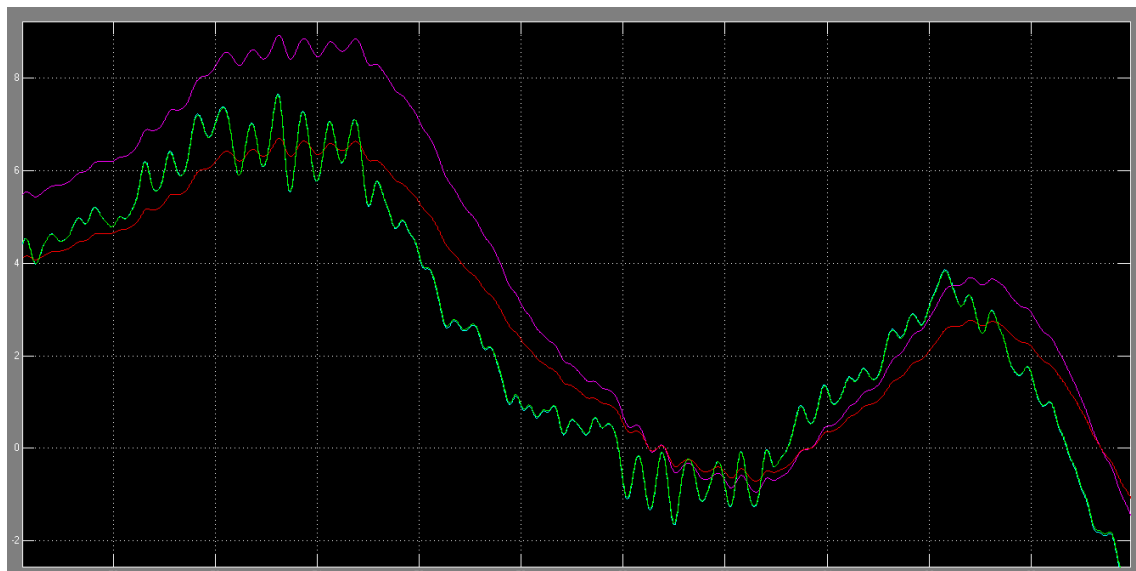


Fig. 105 Modelo realizado en SIMULINK para validar la mejora 2

En la fig. 94 se puede observar la respuesta de cada uno de los modelos anteriores. Los colores corresponden con los que se ha señalado en la fig. 93 cada uno de los modelos.



**Fig. 106 Validación mejora 2**



**Fig. 107 Zoom Validación mejora 2**

Puede observarse que los modelos 1, 2 y 4 funcionan igual y el modelo 3 de forma muy parecida. El hecho de que este último no funcione de la misma manera que los otros tres, es debido al número de decimales empleado para la elaboración de la función de transferencia.

Se observa que la mejora 2 reduce la amplitud de la respuesta de la entrada (respuesta 5 en color rosa). Por tanto, se da por válida la inclusión de la mejora 2 dentro del código fuente.

### 8.3 Propuesta de mejora 3: filtro Lead - Lag con ganancia variable

Esta mejora va en consonancia con la mejora 2. Se utiliza el mismo filtro Lead – Lag que en dicha mejora, pero la **ganancia** aplicada es **variable** en función del punto de operación. A continuación, se muestra el motivo de la mejora así como su explicación. Además, se detalla cómo se ha introducido la misma dentro del código fuente del controlador.

#### 8.3.1 Motivo de la mejora 3

Una vez realizado el análisis de cómo afectan los retrasos en el sistema, se observa que no afectan de la misma manera en cada punto de operación tal y como puede apreciarse en la tabla 24.

Tabla 24 Márgenes de estabilidad del Lazo Abierto

| Márgenes de estabilidad del Lazo Abierto |         |          |         |          |         |          |
|--|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| Punto de operación                       | 13 m/s  |          | 19 m/s  |          | 25 m/s  |          |
| Sistema                                  | MG [dB] | MF [deg] | MG [dB] | MF [deg] | MG [dB] | MF [deg] |
| Planta Referencia                        | 5.46    | 40.40    | 6.66    | 58.80    | 8.06    | 90.2     |
| Retraso 50 steps                         | 2.53    | 21.30    | 3.72    | 40.60    | 6.19    | 85.9     |

Sin embargo, no se desea modificar el filtro Lead – Lag diseñado, sino que la ganancia varíe en función del punto de operación en el que se encuentre el sistema.

#### 8.3.2 Explicación teórica de la ganancia variable

El hecho de que el valor de la ganancia sea variable en función del punto de operación en el que nos encontremos, hace que sea posible un control mucho más ajustado. El valor de esta ganancia va a depender del ángulo de pitch que tenga el aerogenerador en cada momento.

El hecho de que la ganancia varía en función del pitch y no del viento, es porque el anemómetro encargado de medir la velocidad del viento está ubicado detrás del rotor y está perturbado por el propio rotor. Además, la velocidad que mide el anemómetro está medida en un solo punto y el pitch es más exacto porque coge la medida en toda la extensión de la pala. Otra razón, es porque el valor del viento varía muy rápido mientras que las variaciones de pitch son más paulatinas.



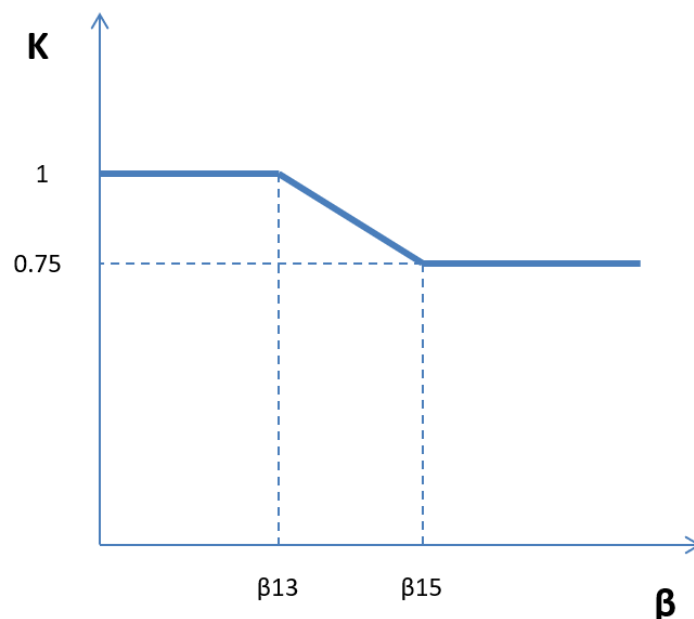


Fig. 108 Valor de la ganancia en función del pitch

En la fig.108 podemos ver la representación lineal del valor de la ganancia en función del pitch o del punto de operación. En dicha gráfica,  $\beta_{13}$  y  $\beta_{15}$  corresponde al valor de pitch que se tiene en el punto de operación a 13 y 15 m/s, respectivamente.

### 8.3.3 Introducción de la mejora 3 en el código fuente del control

La inclusión del **Lead – Lag con ganancia variable** se hace de la misma forma que el de la mejora 2. De hecho, se mantiene el mismo archivo fuente y tan solo se modifica la expresión de la ganancia.

En este caso, se programa diferentes ecuaciones de la recta en función del valor de ángulo de pitch medido. El nombre de dicha variable es `rMeasuredPitchBlade1`. Al ser pitch colectivo, el ángulo de pitch en cada pala es el mismo.

## 9. CONCLUSIONES: ANÁLISIS DE CONTROL

En este apartado se va analizar los resultados obtenidos con las mejoras propuestas en el Capítulo 8.

Cabe destacar que la mejora 2 es la principal y sobre la que muestran la mayoría de los resultados obtenidos. El diseño de la mejora 2, tal y como se ha visto, se hace teniendo en cuenta una cantidad de retrasos (50 steps) en el control de pitch.

Aclarar que la mejora 1 se ha visto su mejora directamente en el **estudio a fatiga** dentro del documento **Complemento del Trabajo Fin de Máster “Simulación mecánica de incertidumbre en sistema de comunicaciones y actuadores de un aerogenerador”**. Por tanto, en este apartado se va a analizar sobre todo los resultados en el modelo lineal de la mejora 2. La mejora 3, al tratarse complementaria a la mejora 2, su estudio también se realiza dentro del documento Complemento.

Por tanto, a continuación, se muestra la mejora conseguida al implementar la mejora 2 en el modelo lineal.

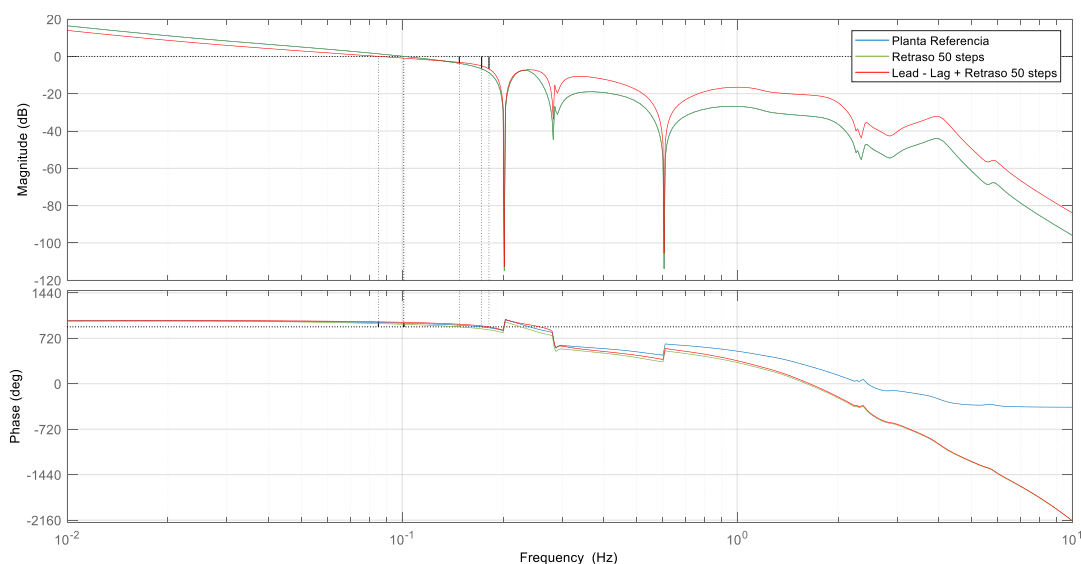


Fig. 109 Comparación lazo abierto con la mejora 2

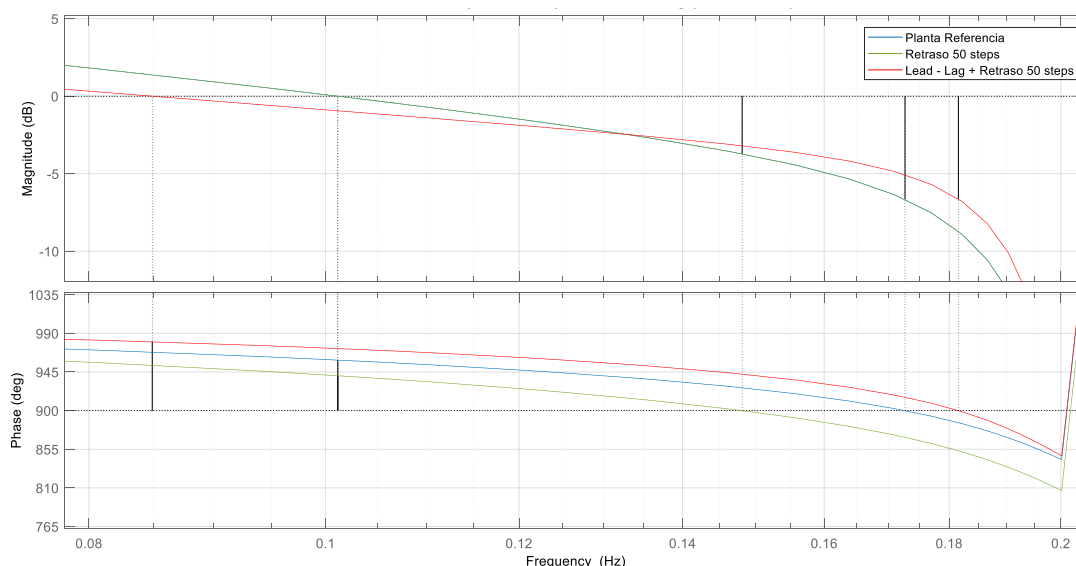


Fig. 110 Zoom Comparación lazo abierto con la mejora 2

En la fig. 109 y 110 se muestra el lazo abierto teniendo como entrada el pitch y como salida la velocidad del generador.

Tabla 25 Comparación márgenes de estabilidad del Lazo Abierto con la mejora 2

| Comparación márgenes de estabilidad del Lazo Abierto |                              |                           |
|--|------------------------------|---------------------------|
| Sistema  | Margen de ganancia (MG) [dB] | Margen de fase (MF) [deg] |
| Planta Referencia                                    | 6.66                         | 58.80                     |
| Retraso 50 Steps                                     | 3.72                         | 40.60                     |
| Lead - Lag + Retraso 50 Steps                        | 6.63                         | 80.20                     |

El objetivo principal de esta mejora era aumentar el valor de los márgenes de ganancia y de fase ya que con la adición de los retrasos en el pitch demandado éstos se reducían considerablemente, haciendo que el lazo cerrado del sistema fuera inestable. En los resultados anteriores se observa que se logra **aumentar el margen de ganancia** en un 78%, siendo muy parecido al que tiene la propia Planta Referencia sin tener en cuenta los retrasos. El **margen de fase se consigue aumentar** en torno a un 97% si tenemos en cuenta los retrasos y un 30% la Planta Referencia sin tener en cuenta los retrasos.

Por tanto, la mejora 2 es más estable no solo teniendo en cuenta los retrasos que se originan debido a las comunicaciones y actuadores, sino que, además, es más estable en cuanto a la fase y prácticamente parecido en cuanto a la ganancia que el propio sistema de referencia sin tener en cuenta los retrasos.

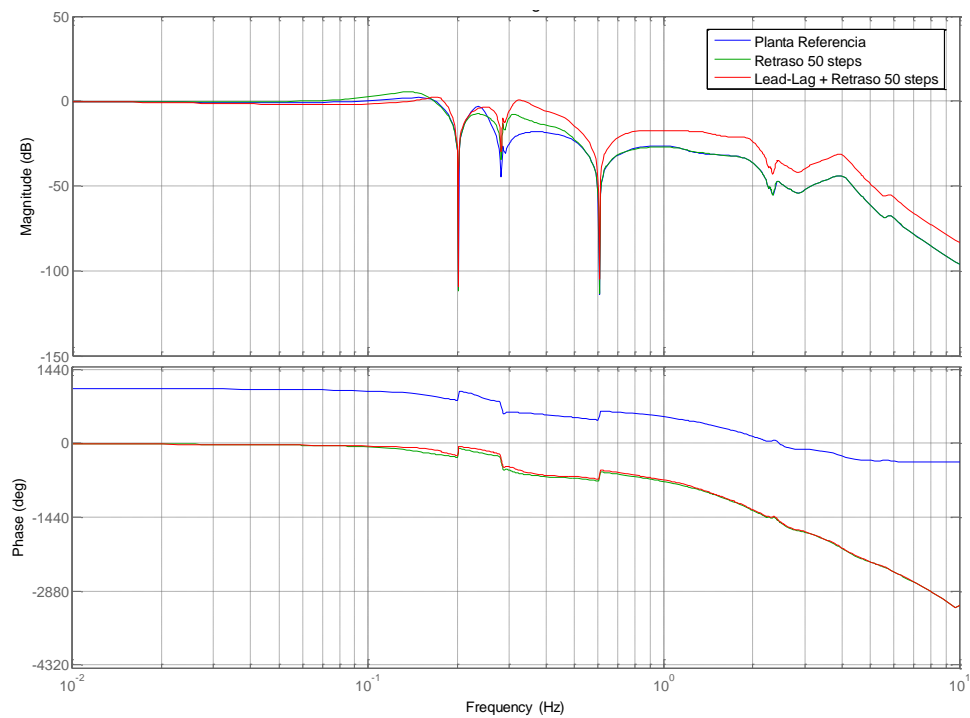


Fig. 111 Comparación Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch con la mejora 2

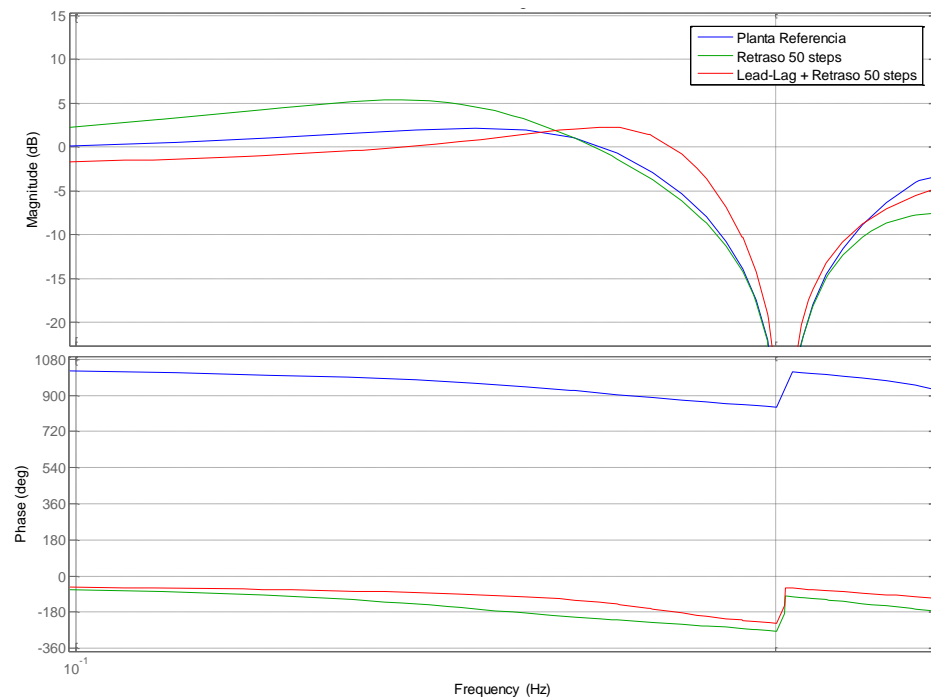


Fig. 112 Zoom Comparación Sensibilidad de seguimiento con la mejora 2

Tabla 26 Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch

### Sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch

| Sistema                       | WB [Hz] | Pico [dB] |
|-------------------------------|---------|-----------|
| Planta Referencia             | 0.177   | 2.19      |
| Retraso 50 steps              | 0.173   | 7.23      |
| Lead – Lag + Retraso 50 steps | 0.183   | 2.33      |

Se aprecia cómo se ha conseguido un **ancho de banda superior** que en el caso de la planta con retraso de 50 steps e incluso superior que el de la Planta Referencia, haciéndolo más rápido en cuanto a seguir la referencia se refiere. Se ha logrado **reducir** considerablemente el **pico** de un valor de 7.23 a 2.33 y aproximarlos bastante al de la Planta Referencia cuyo valor es de 2.19.

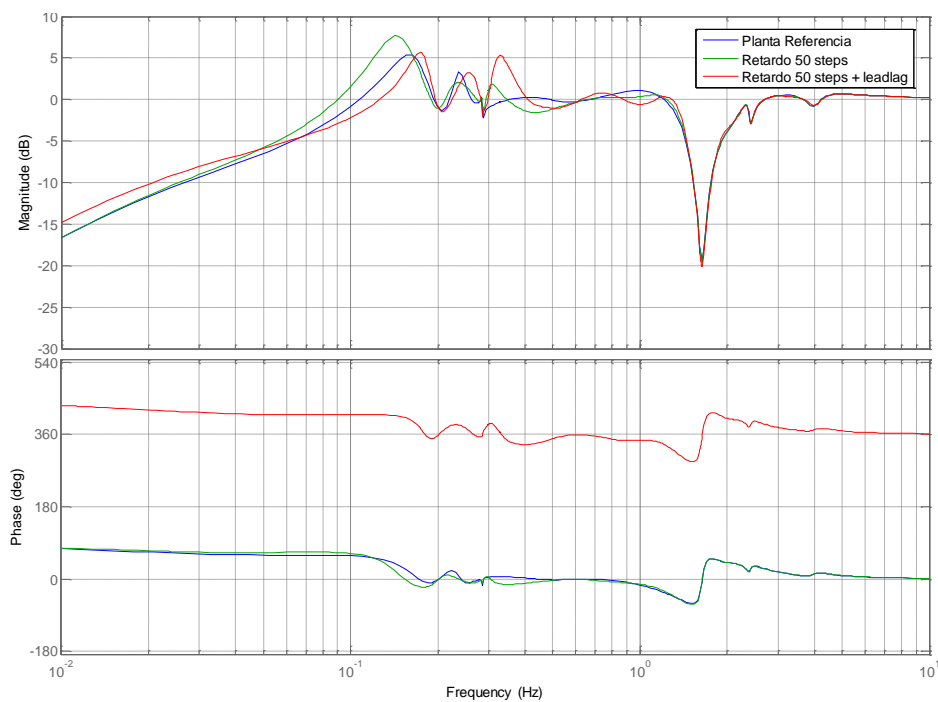


Fig. 113 Comparación Sensibilidad de rechazo a perturbaciones con la mejora 2

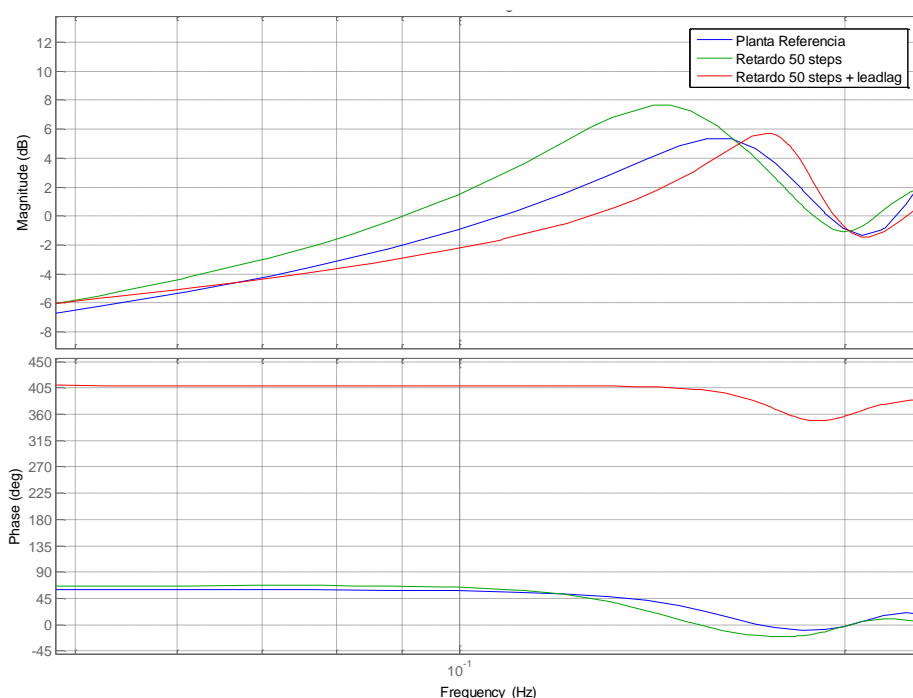


Fig. 114 Zoom Comparación Sensibilidad de rechazo a perturbaciones con la mejora 2

Tabla 27 Comparación sensibilidad de rechazo a perturbaciones del lazo de pitch con la mejora 2

| Comparación sensibilidad de rechazo a perturbaciones del scontrol |         |           |
|---|---------|-----------|
| Sistema   | WB [Hz] | Pico [dB] |
| Planta Referencia   | 0.081   | 5.34      |
| Retraso 50 steps  | 0.069   | 8.95      |
| Lead – Lag + Retraso 50 steps                                     | 0.084   | 2.33      |

Puede observarse, cómo se logra **aumentar** el valor del **ancho de banda** respecto el ancho de banda del sistema con 50 steps de retrasos en un 21.7% aproximadamente. El **pico** se logra **reducir** considerablemente en torno a un 26%. Sin embargo, cabe destacar que no solo se logra inmunizar al sistema frente a retrasos sino que se logra mejorar el propio sistema de referencia sin tener en cuenta los retrasos aumentando su ancho de banda en un 3.7% y reduciendo su pico en un 43.6%.

Se aprecia que con la inclusión del Lead – Lag aparece un nuevo pico a 0.4 Hz que hay que tener en cuenta. En el documento del Complemento del Trabajo Fin de Máster se muestra la actividad de pitch en el dominio temporal y frecuencial en el punto de operación a 19 m/s donde se analiza el comportamiento del pitch a dicha frecuencia con y sin la mejora implementada.

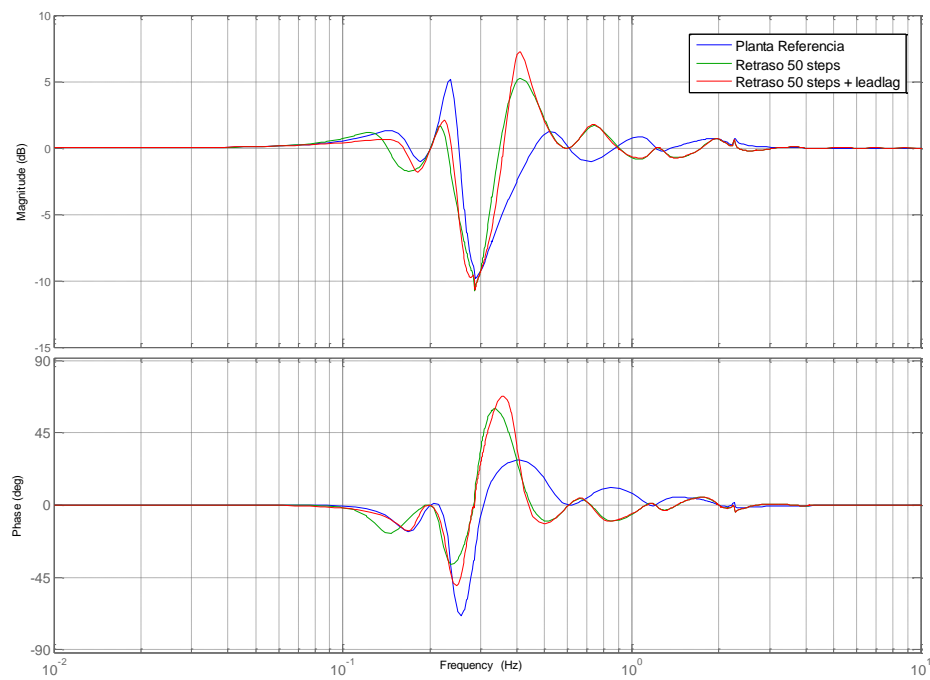


Fig. 115 Comparación Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD

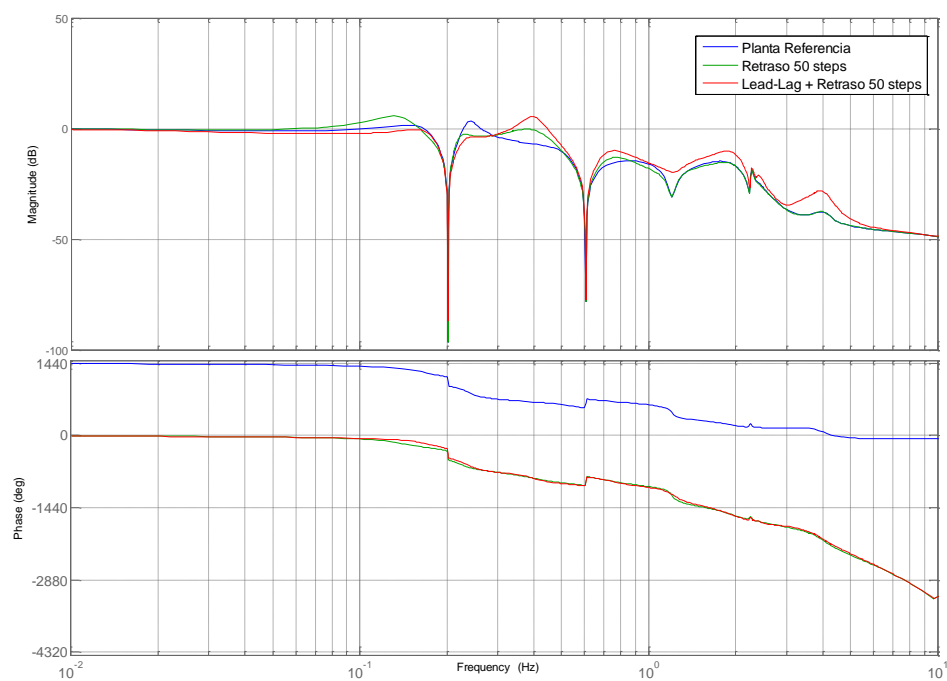
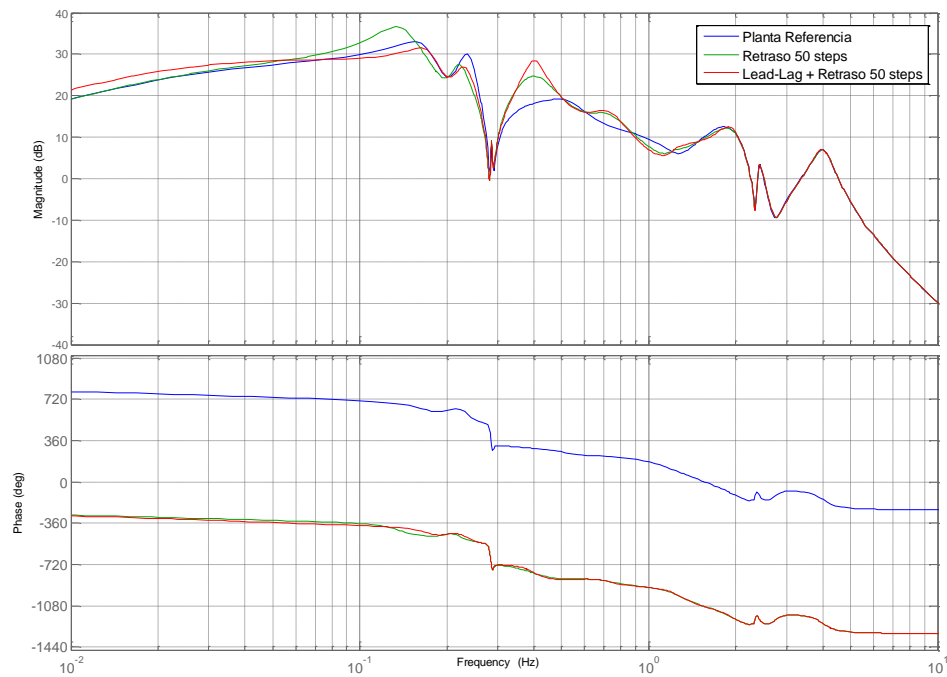
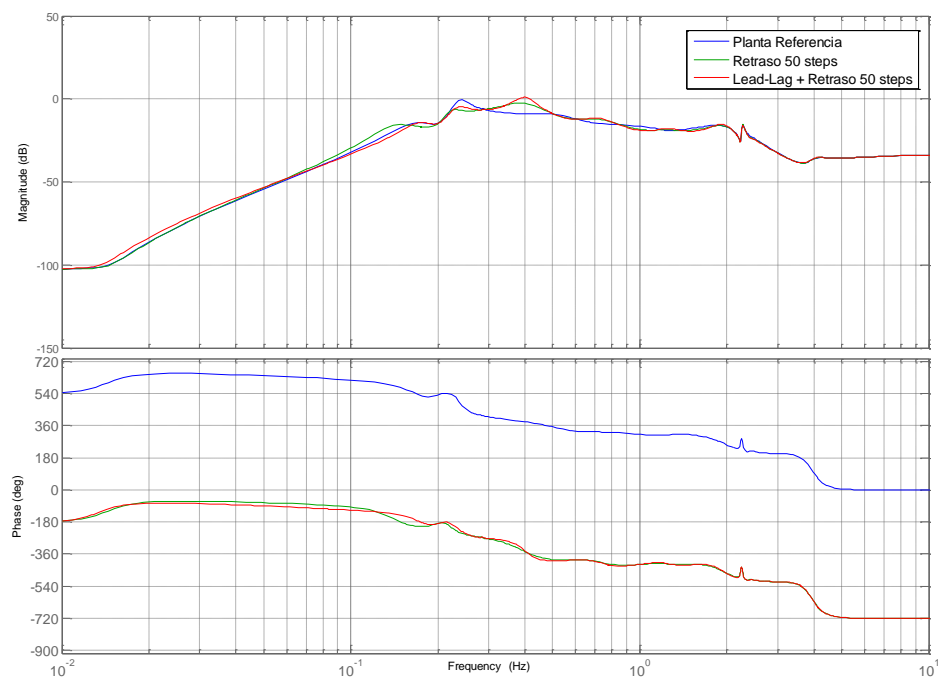


Fig. 116 Comparación Efecto del viento en el pitch con la mejora 2

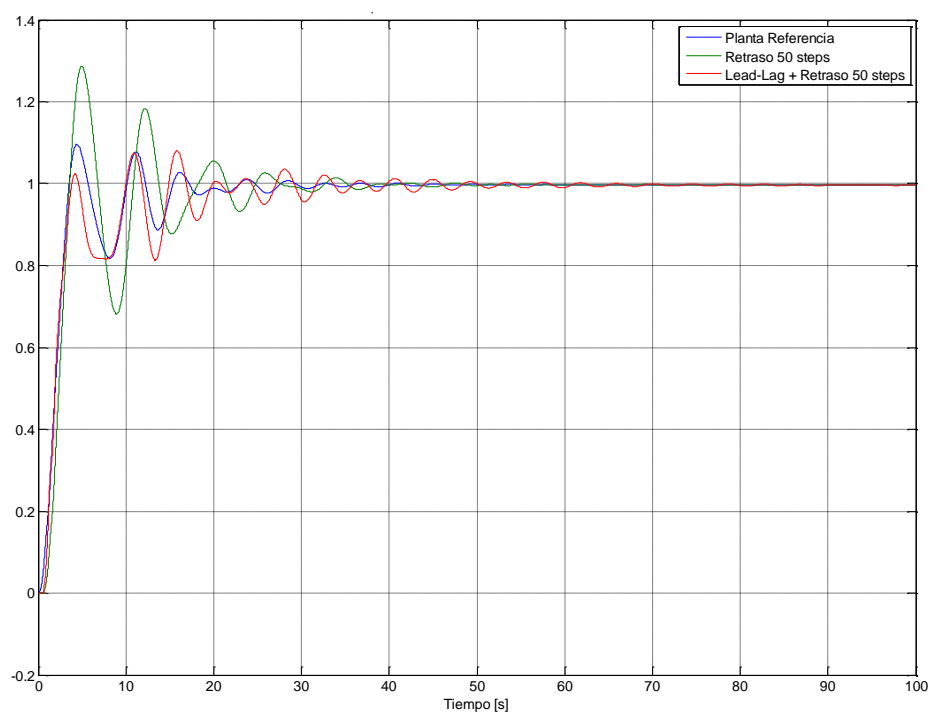


**Fig. 117 Comparación Efecto del viento en la velocidad del generador con la mejora 2**

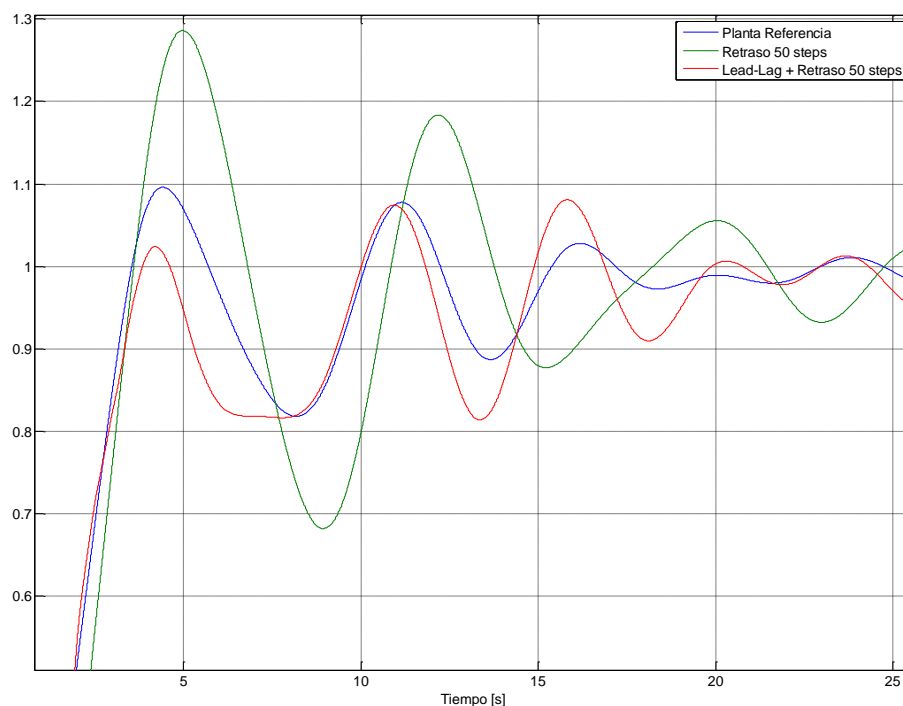


**Fig. 118 Comparación Efecto del viento en la aceleración de la torre con la mejora 2**





**Fig. 119 Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de la referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)**



**Fig. 120 Zoom Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de la referencia del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)**

Tabla 28 Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch

| Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del lazo de pitch |      |        |
|---|------|--------|
| Sistema   | Mp   | Ts [s] |
| Planta Referencia   | 1.10 | 14.77  |
| Retraso 50 steps  | 1.29 | 23.77  |
| Lead – Lag + Retraso 50 steps   | 1.02 | 17.33  |

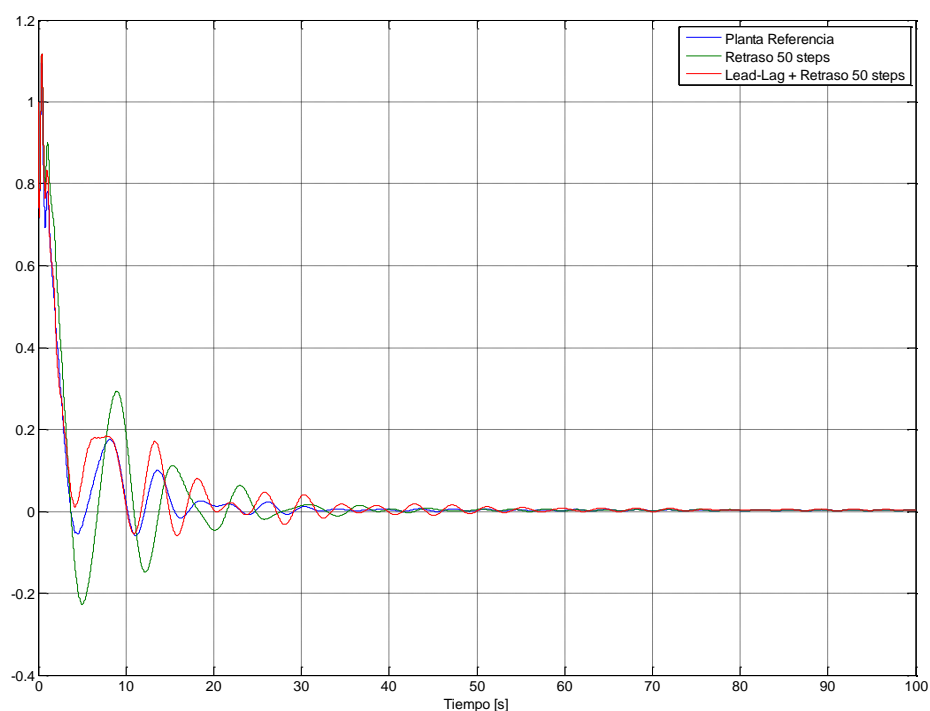


Fig. 121 Respuesta escalón sensibilidad a rechazo de perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)

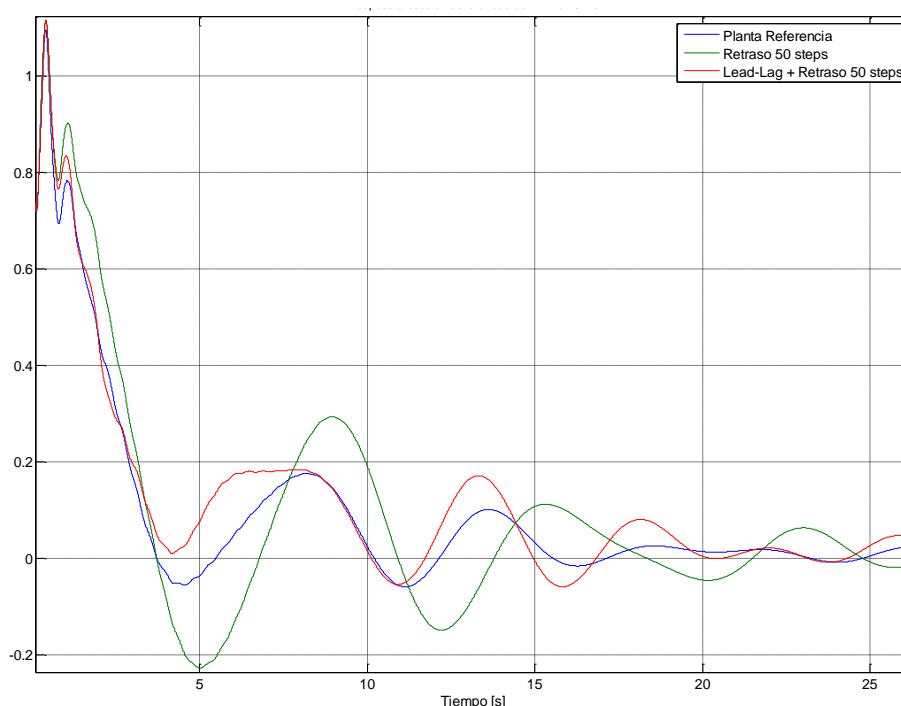


Fig. 122 Zoom Respuesta escalón sensibilidad a rechazo de perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19m/s)

Tabla 29 Respuesta escalón sensibilidad a rechazo de perturbaciones del lazo de pitch

| Respuesta escalón sensibilidad a rechazo de perturbaciones del lazo de pitch |      |        |
|--|------|--------|
| Sistema  | Mp   | Ts [s] |
| Planta Referencia  | 1.10 | 14.75  |
| Retraso 50 steps   | 1.16 | 23.67  |
| Lead – Lag + Retraso 50 steps  | 1.16 | 19.03  |

Puede verse que ambas respuestas escalón coincide con los bodes que se han representado anteriormente. Se aprecia que en la respuesta escalón de la sensibilidad de seguimiento de la referencia la respuesta es más rápida con la mejora 2 implementada (más ancho de banda) pero le cuesta más estabilizar el error en estacionario. Ocurre lo mismo con la respuesta a rechazo a perturbación lo cual hace que sea muy bueno ya que es el tipo de respuesta que necesita un sistema como un aerogenerador, en el que el control se diseña como rechazo a perturbación sobre todo más que para seguimiento de la referencia.

Finalmente, se concluye que el Lead – Lag diseñado no solo **mejora el modelo lineal de la planta con un retraso conocido**, sino que, además, **mejora la Planta de Referencia**. Por tanto, se podría decir que el Lead – Lag propuesto, es un diseño robusto capaz de actuar igual o mejor que la Planta de Referencia teniendo en cuenta tanto retrasos como sin tenerlos.

## 10. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

Este capítulo va a consistir en analizar los objetivos propuestos y ver si se han llevado a cabo cada uno de ellos en el desarrollo de este proyecto.

- **Aprendizaje de la herramienta FAST de NREL.**

Tal y como se ha visto, este proyecto se ha basado en la utilización de la herramienta FAST de NREL. Esta herramienta se ha empleado tanto para obtener los modelos lineales para poder realizar el estudio y diseño de los algoritmos de control y para obtener las simulaciones mecánicas explicadas en el Complemento del Trabajo Fin de Máster “Simulación mecánica de incertidumbre en sistema de comunicaciones y actuadores de un aerogenerador”.

Gracias a [8]-[13], el aprendizaje ha sido mucho más dinámico.

- **Aprendizaje de la estrategia de control tradicional de un aerogenerador.**

Al tener la oportunidad de estar dentro del departamento de Tecnología, en el área de control de la empresa Siemens Gamesa, he podido asistir a un curso de formación interno sobre la estrategia de control de un aerogenerador. Además, en [3] y en la que se basa todo este proyecto, está explicada la estrategia de control que ha empleado.

- **Mejorar el control del pitch haciéndolo más inmune a la influencia de los retrasos en las comunicaciones del aerogenerador y en los sistemas de actuación.**

En el capítulo 9 se ha mostrado los resultados obtenidos en el modelo lineal, es decir, en el estudio a lo referente al control. En él se ha podido ver que se ha aumentado ambos márgenes de estabilidad, ganancia y fase tanto teniendo en cuenta el sistema con retrasos como sin tenerlos. Es decir, se ha logrado mejorar la estabilidad incluso del sistema de referencia frente un sistema con retrasos y la mejora 2 (filtro Lead – Lag y ganancia).

Además, se muestra que en el modelo lineal se ha conseguido una mayor rapidez ganando ancho de banda y un menor pico, haciendo que el sistema sea mucho más estable ante cualquier perturbación a la que esté sometido el sistema. Esta mejora de nuevo se consigue frente al sistema sin retrasos.

Por lo tanto, se ha visto que con la inclusión del filtro Lead – Lag se consigue mejorar e inmunizar el sistema frente a retrasos y además, incluso igualar o mejorar la Planta de Referencia sin tener en cuenta los retrasos frente al sistema con retrasos y la mejora 2 (filtro Lead – Lag y ganancia). Por tanto, el diseño propuesto se trata de un **diseño robusto**.

- **Mejorar las cargas a fatiga de varios componentes del aerogenerador respecto a las que sufren teniendo en cuenta los retrasos para aumentar su vida útil.**

La información de este objetivo viene recogida en el documento Complemento del Trabajo Fin de Grado “Simulación mecánica de incertidumbre en sistema de comunicaciones y actuadores de un aerogenerador”.

En cuanto al modelo en simulación, se ha demostrado también que las cargas se han reducido considerablemente teniendo en cuenta retrasos tanto constantes como aleatorios, en el control de pitch, velocidad del generador y ambos actuando de manera simultánea.

Además, se comprueba su funcionamiento sin tener en cuenta los retrasos y se observa que las cargas a fatiga se reducen también con respecto la Planta Referencia.

Por tanto, el filtro Lead – Lag junto con la ganancia diseñado es un diseño **robusto** capaz de actuar de manera adecuada con el controlador de referencia sin retrasos además de mejorar la planta teniendo en cuenta los diferentes tipos retrasos debidos a las comunicaciones y actuadores que pueden darse en el lazo de pitch.

## 11. LÍNEAS FUTURAS

Resulta imprescindible que se siga invirtiendo en proyectos académicos donde los estudiantes puedan profundizar temas que ocurren en la vida real industrial. De esta manera, además de que el alumno aprende, puede conseguir grandes resultados muy beneficiosos para la empresa particular y para contribuir en la mejora en la producción y aprovechamiento de las energías y recursos renovables, respectivamente.

Dentro de este proyecto, existen todavía diferentes mejoras que se pueden realizar empleando la estrategia de control de referencia elaborada de [3]. A continuación, se expone diferentes posibles mejoras que se pueden llevar a cabo en futuros proyectos:

- **Cambiar la escritura de los componentes que constituyen la estrategia de control de referencia dentro del código fuente.**

El DTD, ATD, PI de par, filtros de pitch y el PI pitch, están expresados en matrices de estado, lo cual dificulta de manera considerable cualquier modificación que se desee hacer sobre ellos. Por ello, se propone la inclusión de las diferentes funciones de transferencia para que su manipulación sea mucho más sencilla y eficaz.

En este proyecto se han obtenido las diferentes funciones de transferencia de cada componente y dentro del mismo, la función de transferencia de cada filtro que lo constituye. A continuación, se muestra cada una de ellas por cada componente:

- DTD
  - $y(k) = 640'2u(k) - 651u(k-1) + 11'4(k-2) + 1'805y(k-1) - 0'8148y(k-2)$
- ATD
  - 1P:  $y(k) = 0'9987u(k) - 1'997u(k-1) + 0'9987u(k-2) + 1'997y(k-1) - 0'9975y(k-2)$
  - 3P:  $y(k) = 0'9925u(k) - 1'984u(k-1) + 0'9925u(k-2) + 1'984y(k-1) - 0'985y(k-2)$
  - Filtro a 1.21Hz:  $y(k) = 0'9925u(k) - 1'979u(k-1) + 0'9925u(k-2) + 1'979y(k-1) - 0'9849y(k-2)$
  - Integrador más filtro paso bajo:  $y(k) = 0'0007866u(k-3) - 0'000733u(k-2) - 0'0007865u(k-1) + 0'000732u(k) + 2'938y(k-1) - 2'877y(k-2) + 0'9391y(k-3)$
- PI par
  - 1P:  $y(k) = 0'9989u(k) - 1'997u(k-1) + 0'9986u(k-2) + 1'997y(k-1) - 0'9975y(k-2)$
  - Filtro segundo modo de la torre side to side:  $y(k) = 0'9973u(k) - 1'963u(k-1) + 0'9973u(k-2) + 1'963y(k-1) - 0'9947y(k-2)$

- Rotor in plane primero colectivo:  $y(k) = 0'9776u(k) - 1'903u(k-1) + 0'9776u(k-2) + 1'903y(k-1) - 0'9553y(k-2)$
- Rotor in plane segundo colectivo:  $y(k) = 1'192u(k) - 2'124u(k-1) + 1'192u(k-2) + 1'77y(k-1) - 0'9865y(k-2)$
- Filtro paso bajo:  $y(k) = 121'9u(k) - 243'8u(k-1) + 121'9u(k-2) + 1'692y(k-1) - 0'7793y(k-2)$
- PI:  $y(k) = 0'5825u(k) - 0'5774u(k-1) + y(k-1)$

○ Filtros de pitch

- 1P:  $y(k) = 0'9985u(k) - 1'997u(k-1) + 0'9985u(k-2) + 1'997y(k-1) - 0'997y(k-2)$
- 3P:  $y(k) = 0'9672u(k) - 1'933u(k-1) + 0'9672u(k-2) + 1'933y(k-1) - 0'9344y(k-2)$
- Filtro paso bajo:  $y(k) = 0'002079u(k) + 0'004158u(k-1) + 0'002079u(k-2) + 1'868y(k-1) - 0'8765y(k-2)$

- **Mejorar el lazo de par.**

Se ha visto que el lazo de par con la inclusión de más de 10 steps de retraso en la lectura de velocidad del generador se vuelve inestable. Se tendría que realizar un lazo de par más robusto a cualquier alteración que pueda aparecer en el sistema, ya que al fin y al cabo, es lo que sucede dentro de cualquier aerogenerador real.

- **Realizar la estrategia de control en SIMULINK.**

Trasladar la estrategia de control escrita en lenguaje C a SIMULINK, haría que la misma fuese mucho más visual y facilitaría la comprensión de la misma a cualquier persona que deseara trabajar con ella. Además, cualquier modificación que se deseara realizar se podría hacer de forma mucho más sencilla y dinámica.

## 12. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] Katsuhiko Ogata. Ingeniería de Control Moderna. Pearson Educación, S.A., CUARTA EDICIÓN 2006.
- [2] J.L. Rodríguez Amenedo, J.C. Burgos Díaz y S. Arnalte Gómez. Sistemas Eólicos de producción de energía eléctrica. Editorial Rueda SL 2003.
- [3] Asier Díaz de Corcuera. DESIGN OF ROBUST CONTROLLERS FOR LOAD REDUCTION IN WIND TURBINES. Febrero de 2013.
- [4] Ervin Bossanyi. Controller for 5MW reference turbine. Garrad Hassan and Partners Limited, Julio de 2009.
- [5] Dimitris Bourlis. A Complete Control Scheme for Variable Speed Stall Regulated Wind Turbines. INTECH, Junio de 2011.
- [6] Acoidán Betancort y Asier Díaz de Corcuera. Gamesa wind turbine control. Diciembre 2016.
- [7] TUA1 Loads & Dynamics section of Siemens Gamesa. Gamesa Wind turbine Loads, Internal training. Noviembre 2011.
- [8] J.M. Jonkman, M.L. Buhl Jr. Fast User's Guide. NREL, 2005.
- [9] <https://nwtc.nrel.gov/FAQ>
- [11] Norma IEC 61400-1. Edición 2, junio de 2006.
- [12] Pedro José López Bractot. Desarrollo de un entorno de validación profesional que facilite el diseño fiable de estructuras de control y estimadores de cargas en aerogeneradores. Enero 2018.
- [13] Pedro José López Bractot. Manual de usuario FAST v7. enero 2018.
- [14] BECKHOFF. PC-based Control for Wind 4.0.
- [15] Idoia San Martín. Apuntes de las clases de Energías Renovables. Universidad Pública de Navarra, 2017.
- [16] Global Wind Energy Council (GWEC)
- [17] Jorge Elso. Apuntes de las clases . Universidad Pública de Navarra, 2017.





## ANEXOS

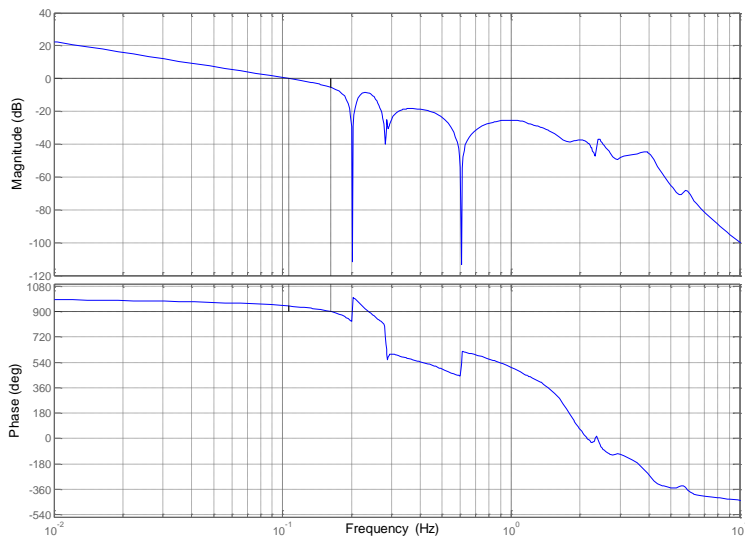
|                  |    |
|------------------|----|
| 1. ANEXO I.....  | 1  |
| 2. ANEXO II..... | 18 |



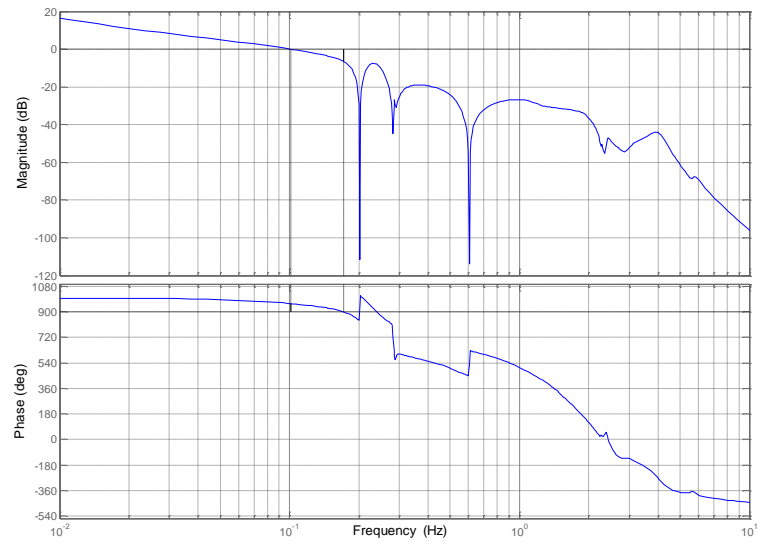
## ANEXO I

Lazo Abierto en todos los Puntos de operación

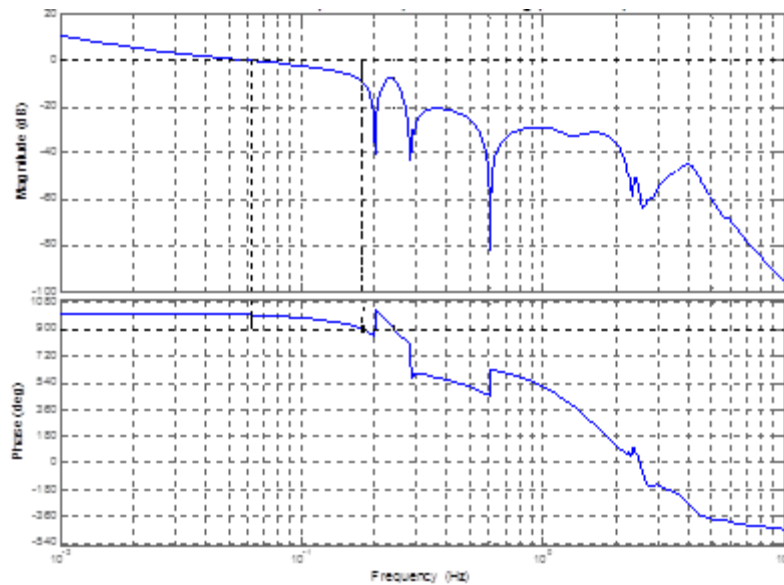
### 2 STEPS



Lazo abierto Retraso 2 steps (Punto de operación a 13 m/s)

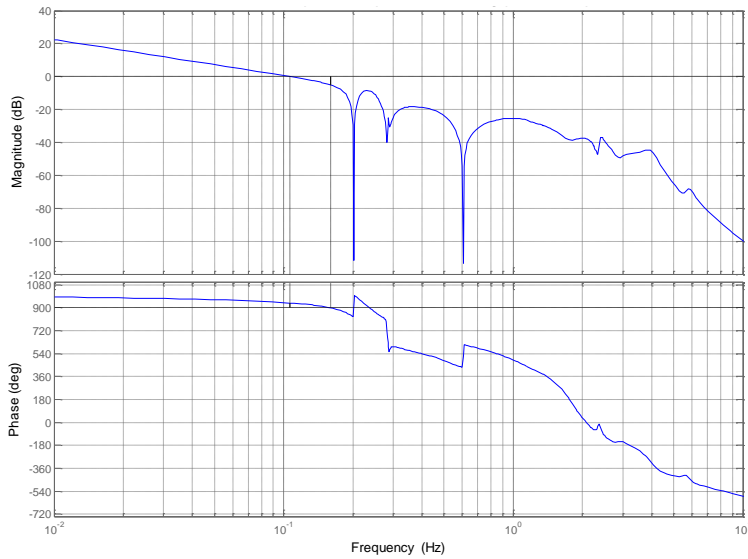


Lazo abierto Retraso 2 steps (Punto de operación a 19 m/s)

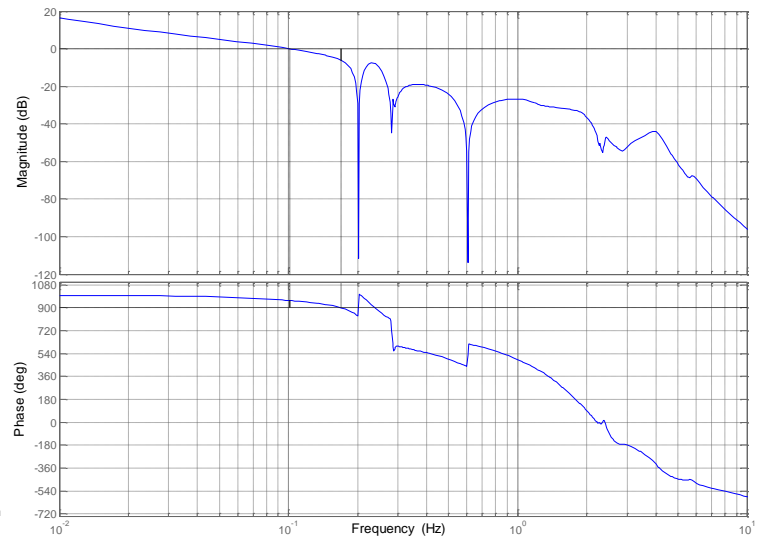


Lazo abierto Retraso 2 steps (Punto de operación a 25 m/s)

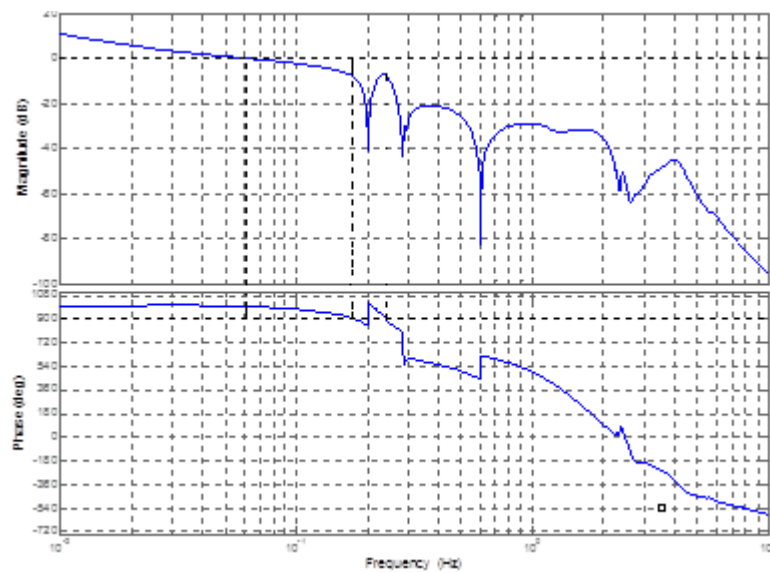
## 6 STEPS



Lazo abierto Retraso 6 steps (Punto de operación a 13 m/s)



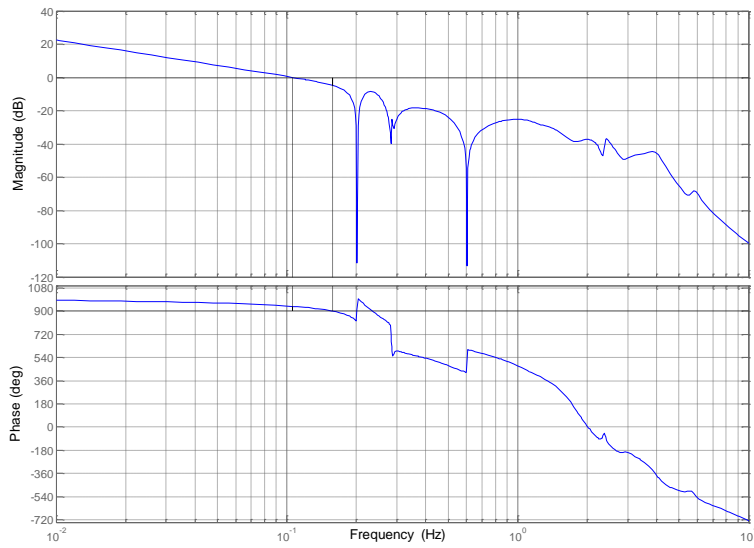
Lazo abierto Retraso 6 steps (Punto de operación a 19 m/s)



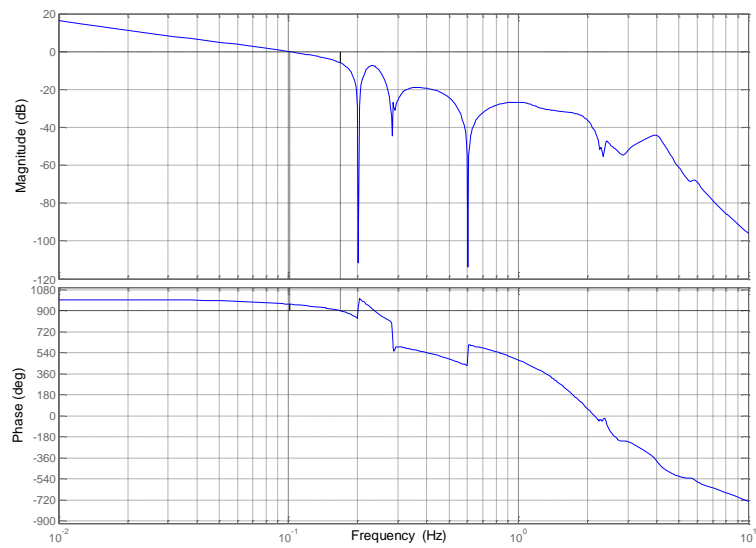
Lazo abierto Retraso 2 steps (Punto de operación a 25 m/s)



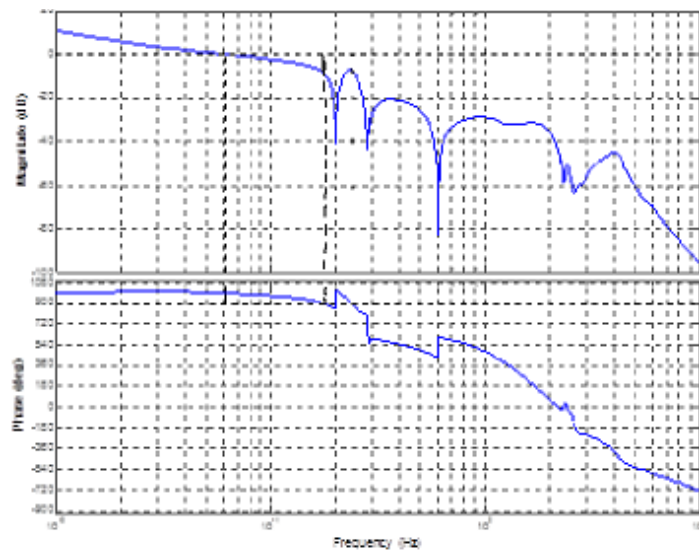
## 10 STEPS



Lazo abierto Retraso 10 steps (Punto de operación a 13 m/s)

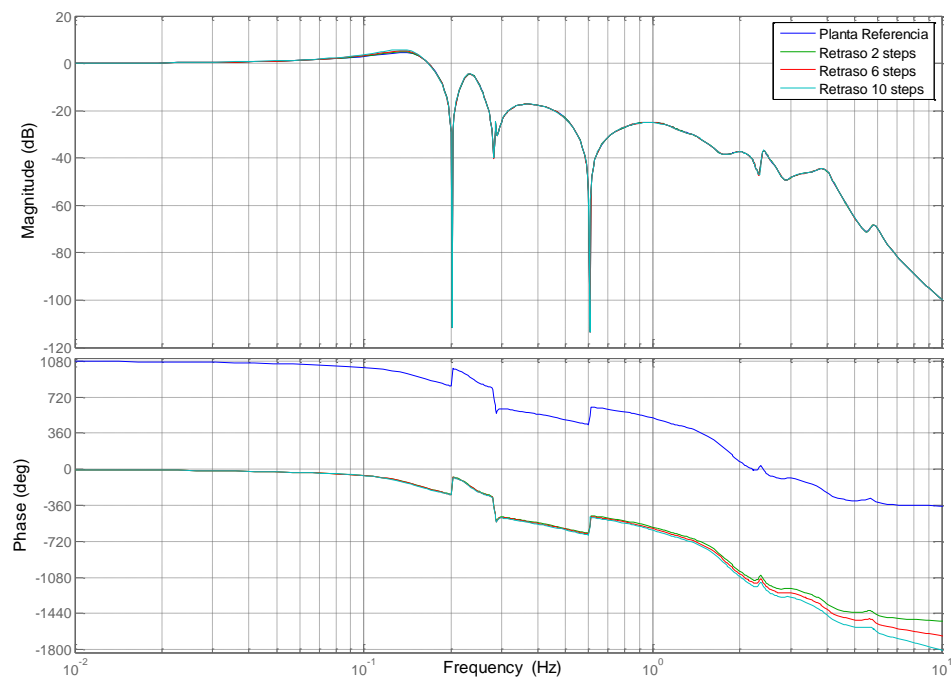


Lazo abierto Retraso 10 steps (Punto de operación a 19 m/s)



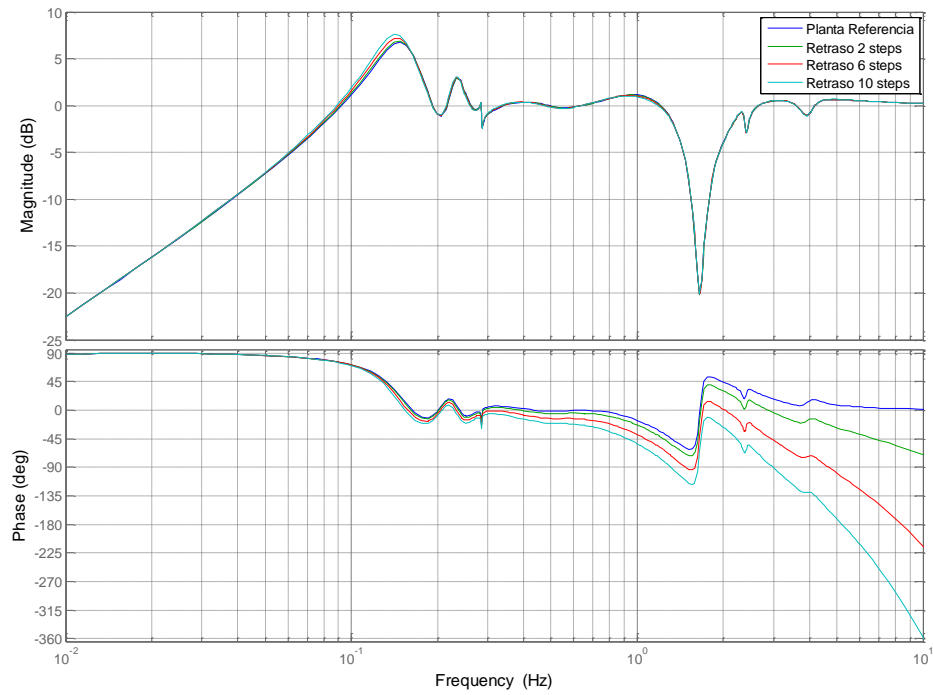
Lazo abierto Retraso 10 steps (Punto de operación a 25 m/s)

## Punto de operación a 13 m/s

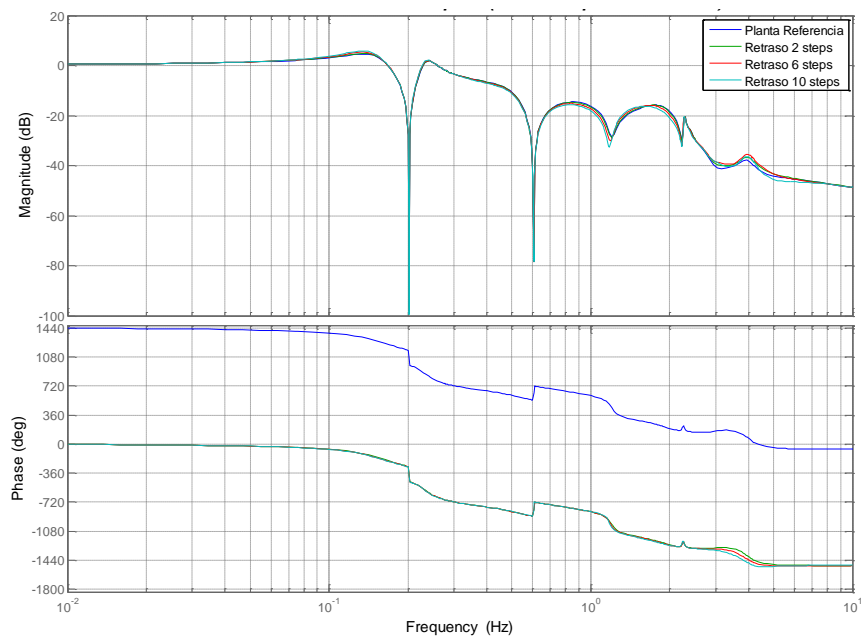


Sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)

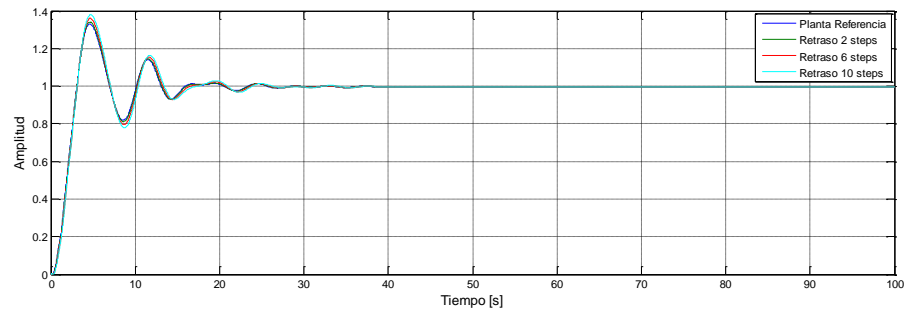




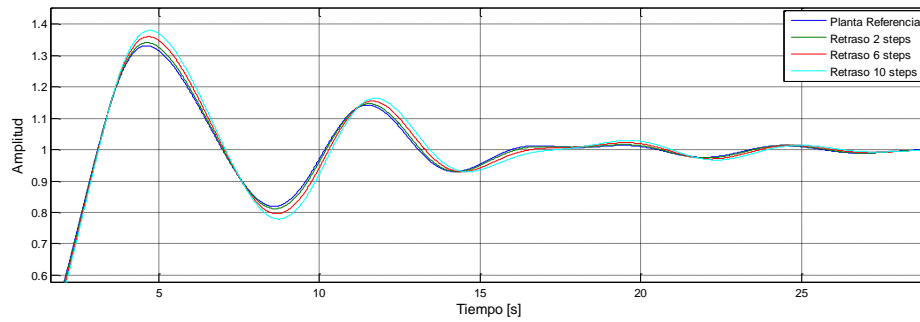
Sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)



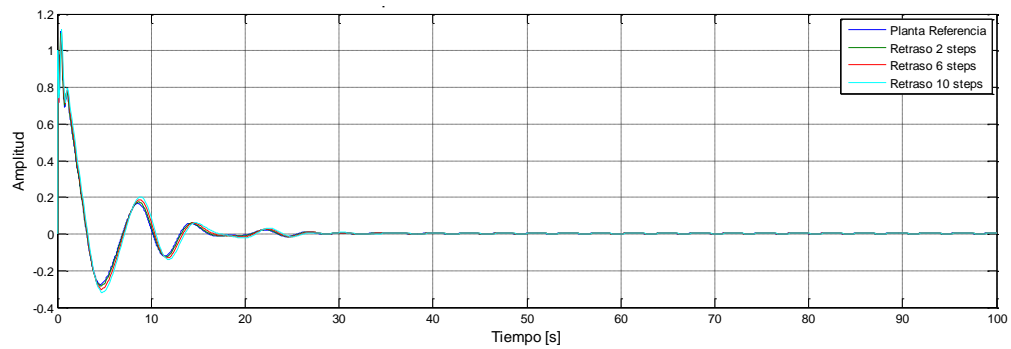
Efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 13 m/s)



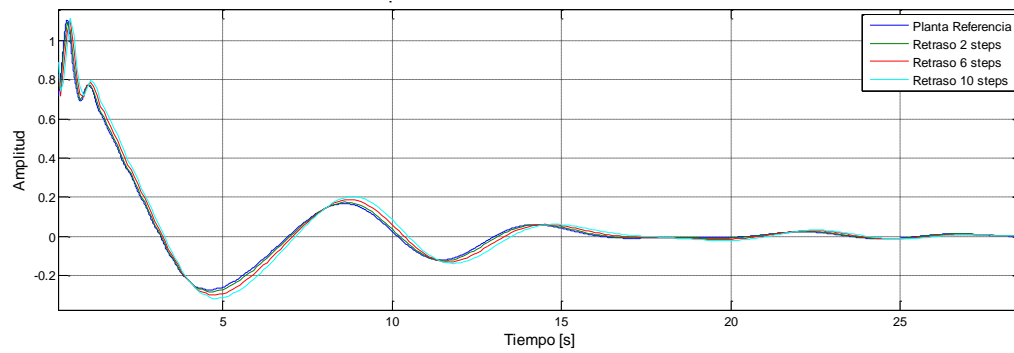
**Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)**



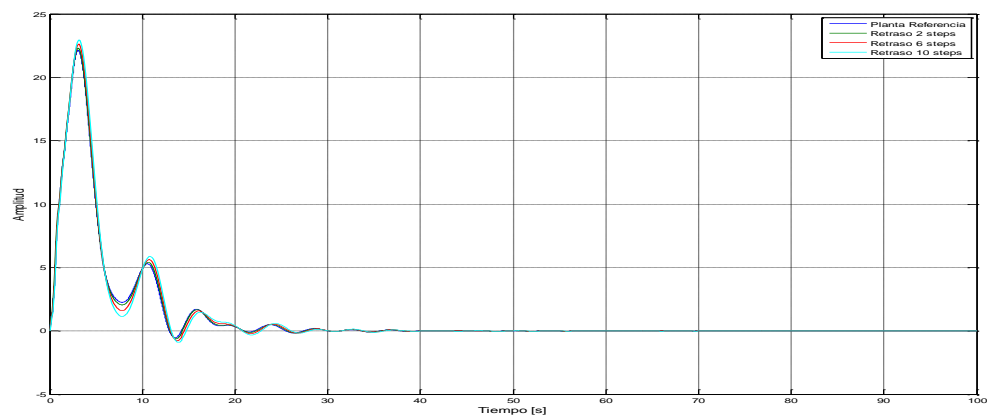
**Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 13m/s)**



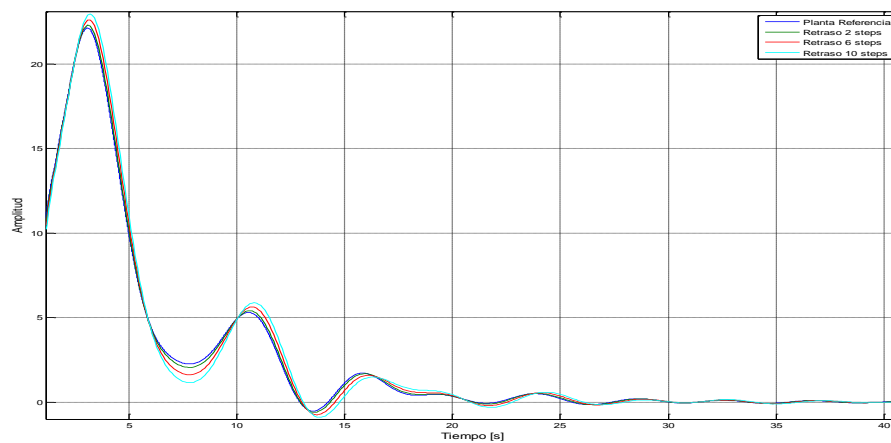
**Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento a perturbaciones scontrol (Punto de operación a 13 m/s)**



Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento a perturbaciones scontrol (Punto de operación a 13m/s)

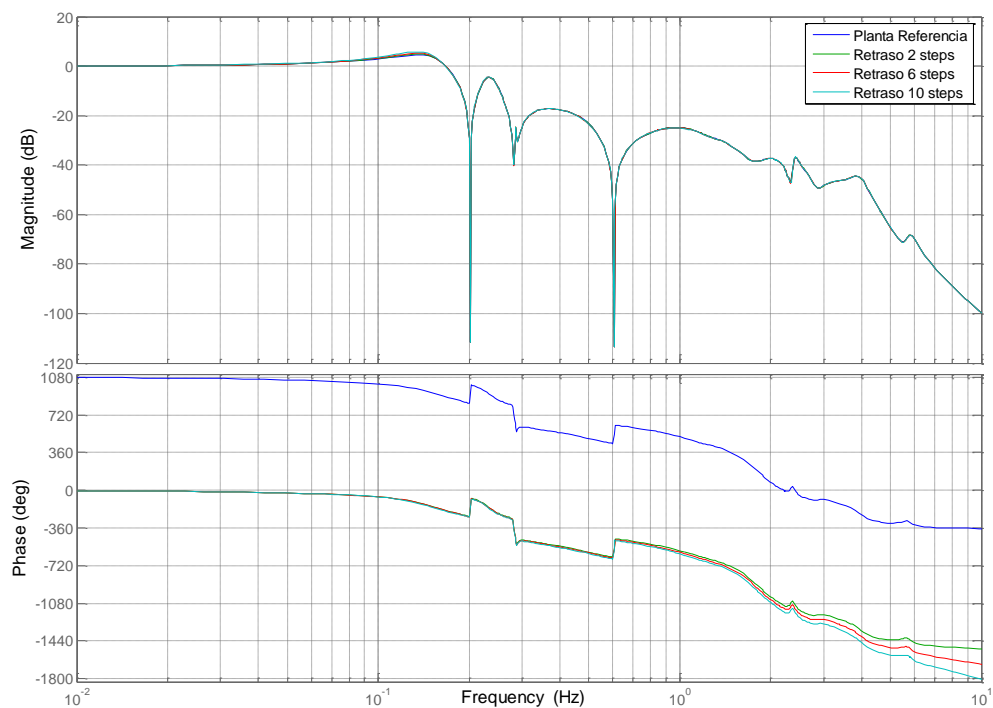


Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 13 m/s)



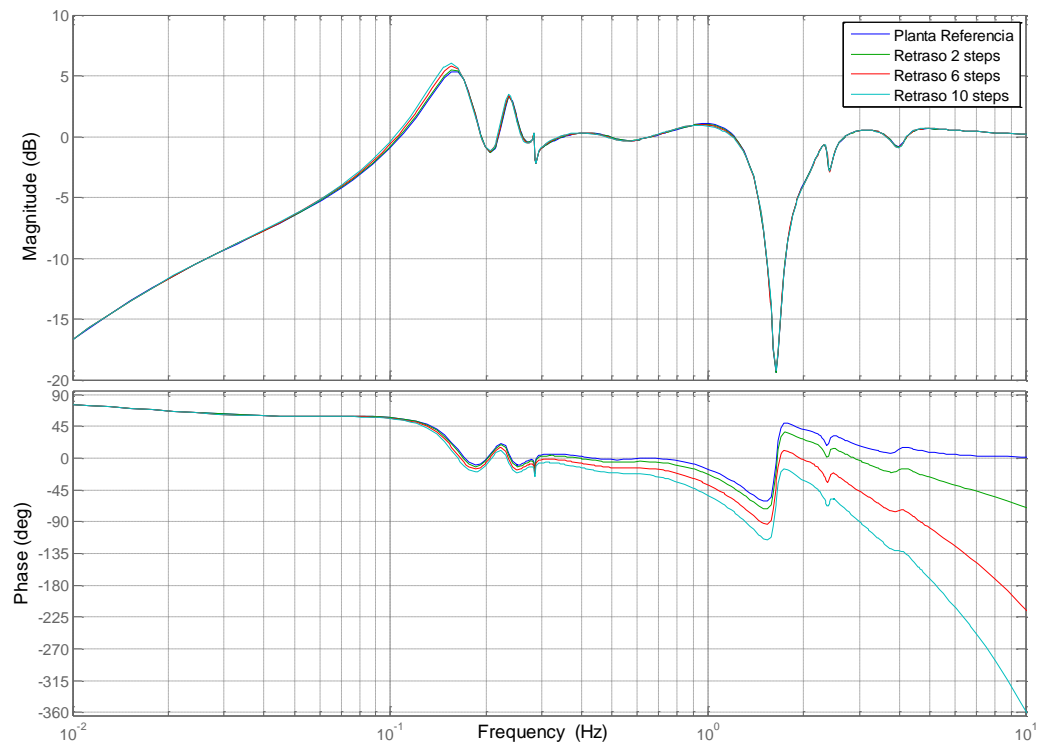
Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 13 m/s)

## Punto de operación a 19 m/s

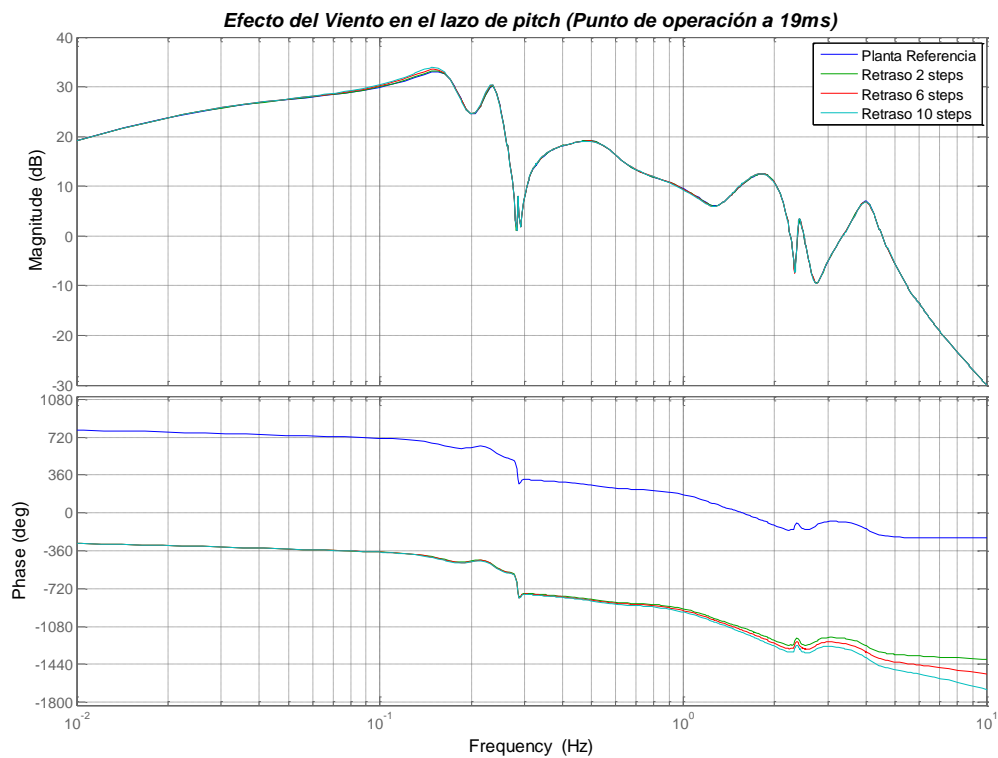


Sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 19 m/s)

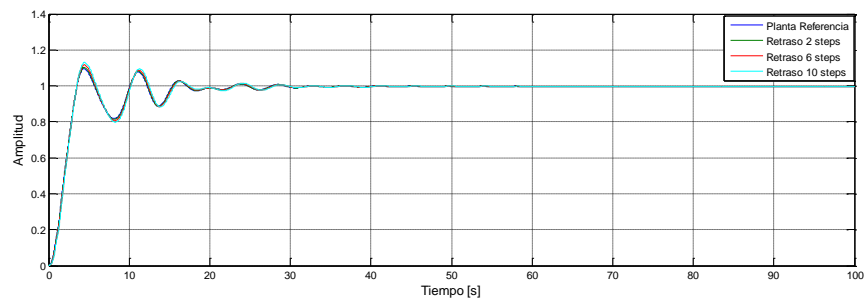
**Sensibilidad ante perturbaciones del lazo de pitch (Punto de operación a 19ms)**



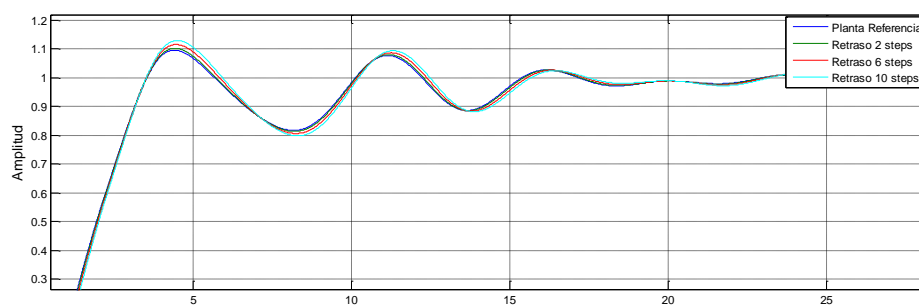
**Sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 19 m/s)**



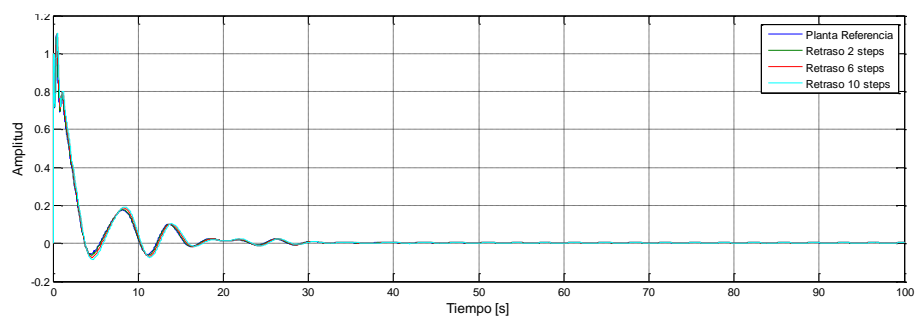
**Efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)**



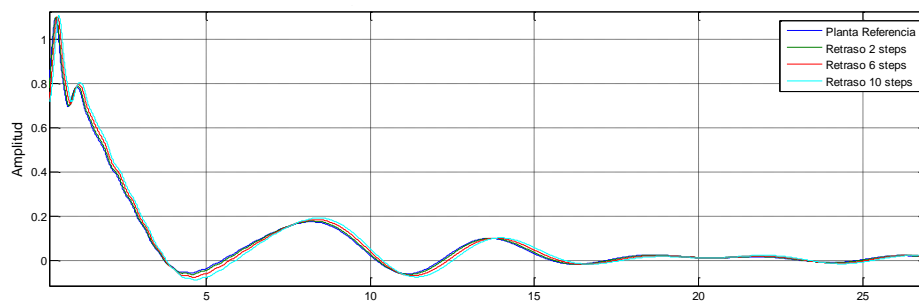
Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 19 m/s)



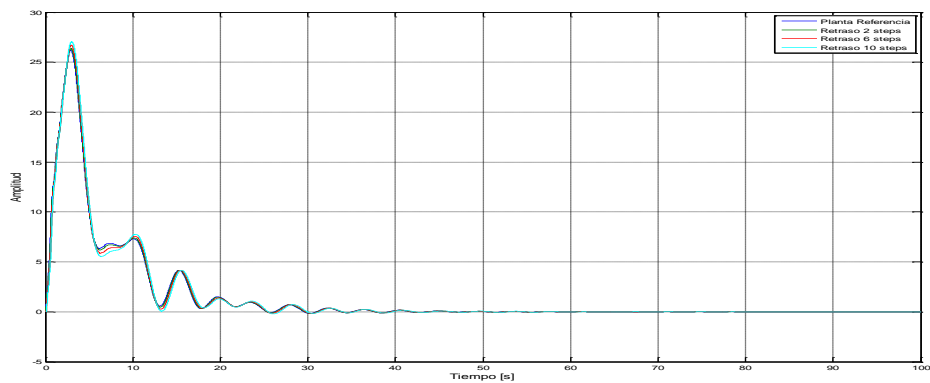
Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 19m/s)



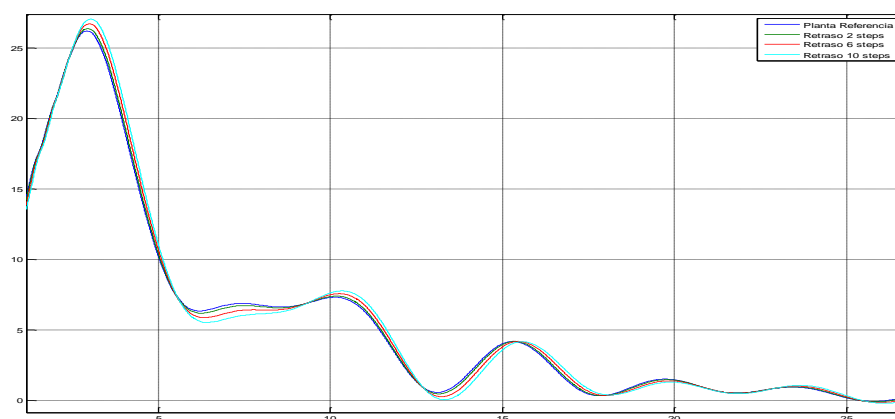
Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento a perturbaciones scontrol (Punto de operación a 19 m/s)



Zoom respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones scontrol (Punto de operación a 19m/s)

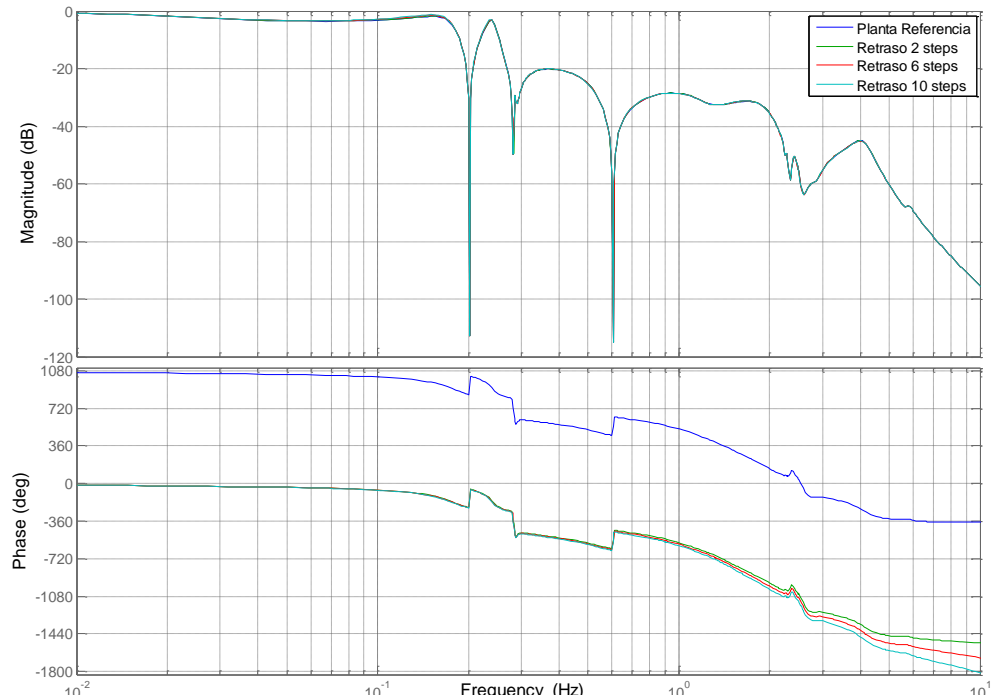


Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

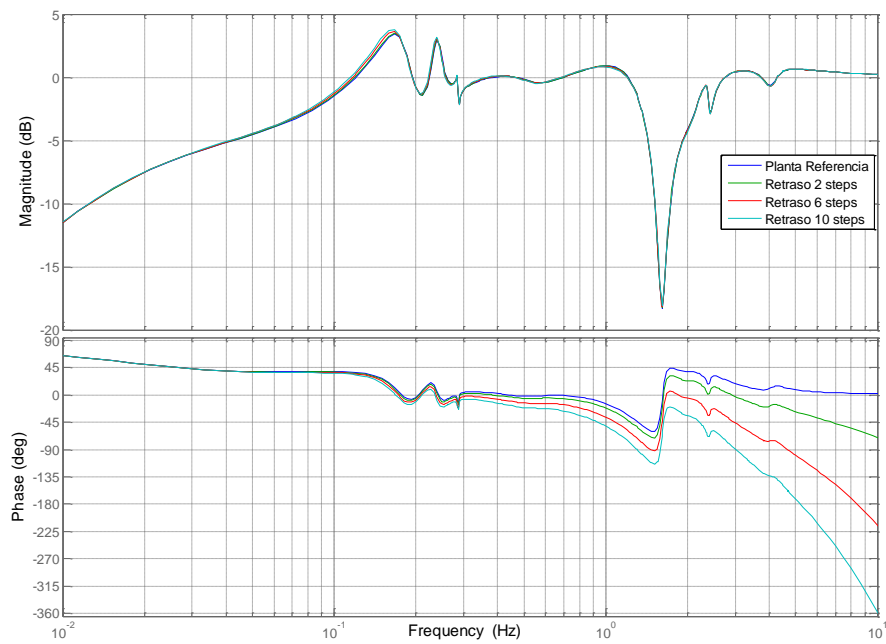


Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

## Punto de operación A 25 m/s

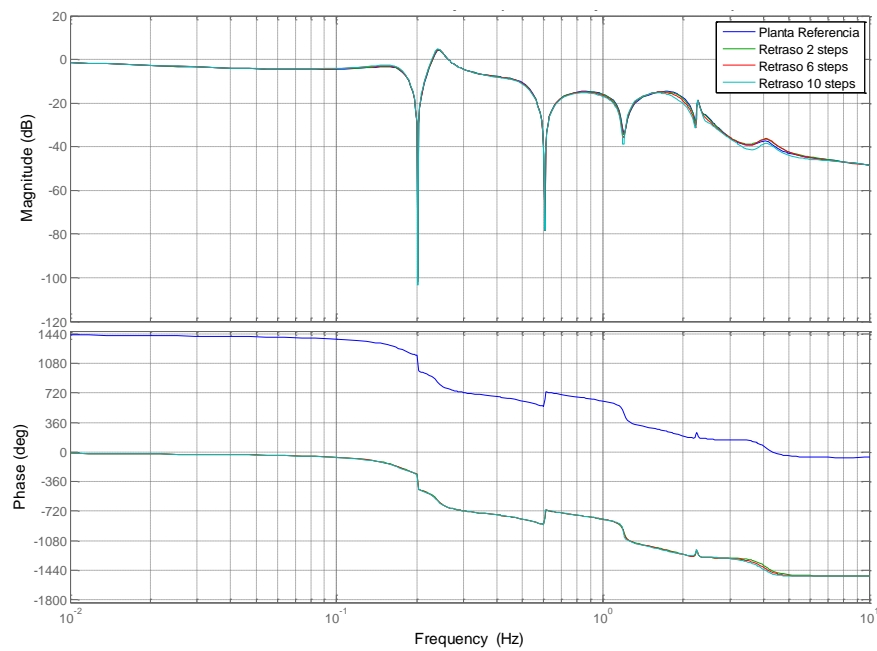


Sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)

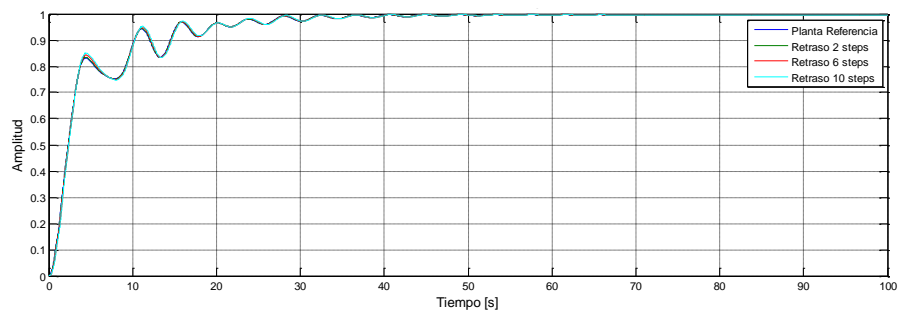


Sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)

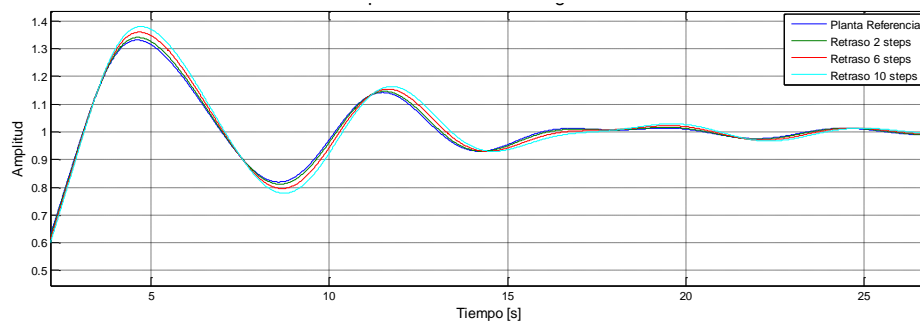




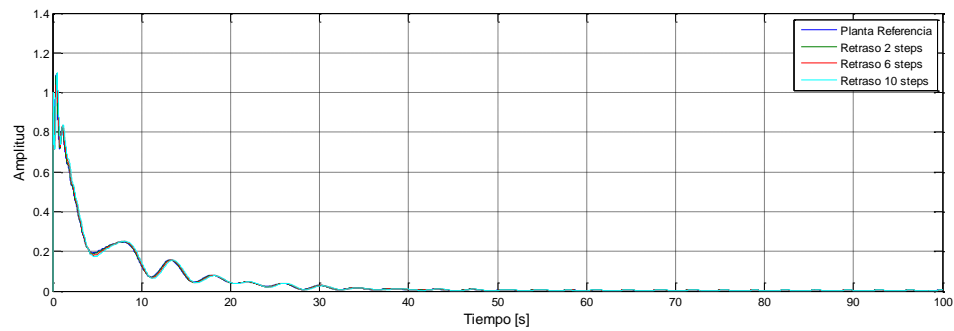
**Fig. 123 Efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 25 m/s)**



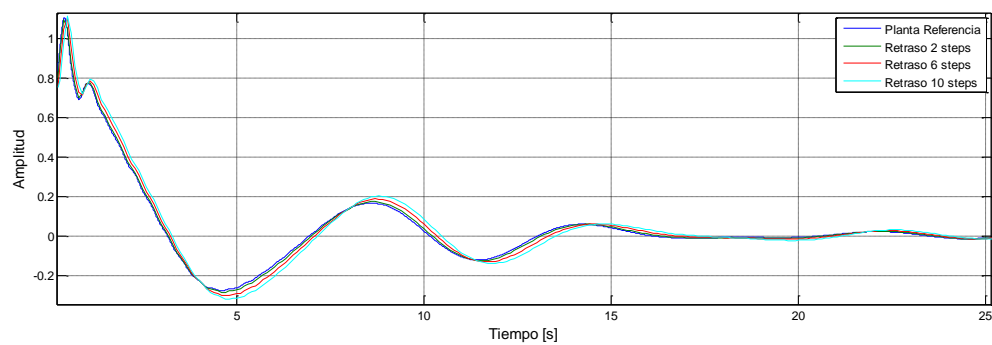
**Fig. 124 Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)**



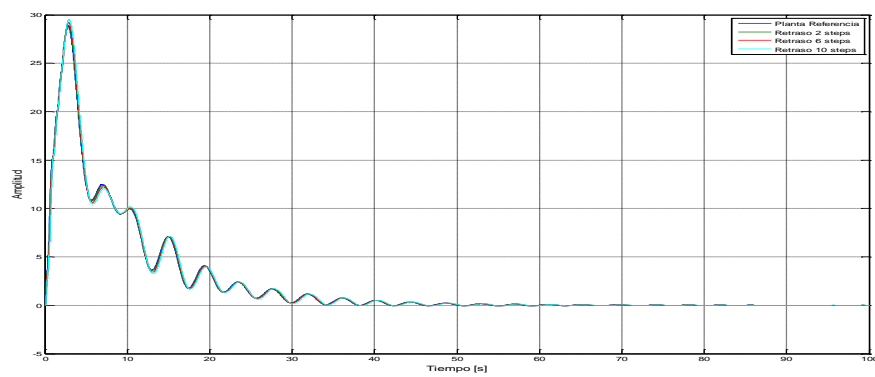
**Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 25m/s)**



Respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones scontrol (Punto de operación a 25 m/s)



Zoom respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones scontrol (Punto de operación a 25m/s)



Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 25 m/s)

Tablas resumen de la referencia, retrasos y puntos de operación.

| Referencia   |           |          |             |           |              |           |                   |        |       |              |        |       |               |        |       |
|--------------|-----------|----------|-------------|-----------|--------------|-----------|-------------------|--------|-------|--------------|--------|-------|---------------|--------|-------|
| Viento [m/s] | OPEN LOOP |          | CLOSED LOOP |           |              |           | RESPUESTA ESCALÓN |        |       |              |        |       |               |        |       |
|              |           |          | Tracking    |           | Sensibilidad |           | Tracking          |        |       | Sensibilidad |        |       | Efecto viento |        |       |
|              | MG [dB]   | MF [deg] | WB [dB]     | Pico [dB] | WB [dB]      | Pico [dB] | Mp                | Ts [s] | t [s] | Mp           | Ts [s] | t [s] | Mp            | Ts [s] | t [s] |
| 13           | 5.46      | 40.4     | 0.1757      | 4.552     | 0.07312      | 6.749     | 1.33              | 14.93  | 2.07  | 1.10         | 14.77  | 2.82  | 3.09          | 35.15  | 12.73 |
| 19           | 6.6       | 58.6     | 0.1773      | 2.191     | 0.08117      | 5.349     | 1.09              | 14.77  | 2.40  | 1.10         | 14.75  | 3.23  | 26.19         | 45.6   | 25.12 |
| 25           | 9.5       | 97.1     | 0.03661     | -0.0      | 0.07671      | 3.413     | -                 | 19.25  | 9.40  | 1.09         | 19.53  | 10.30 | 28.8          | 61.77  | 33.73 |

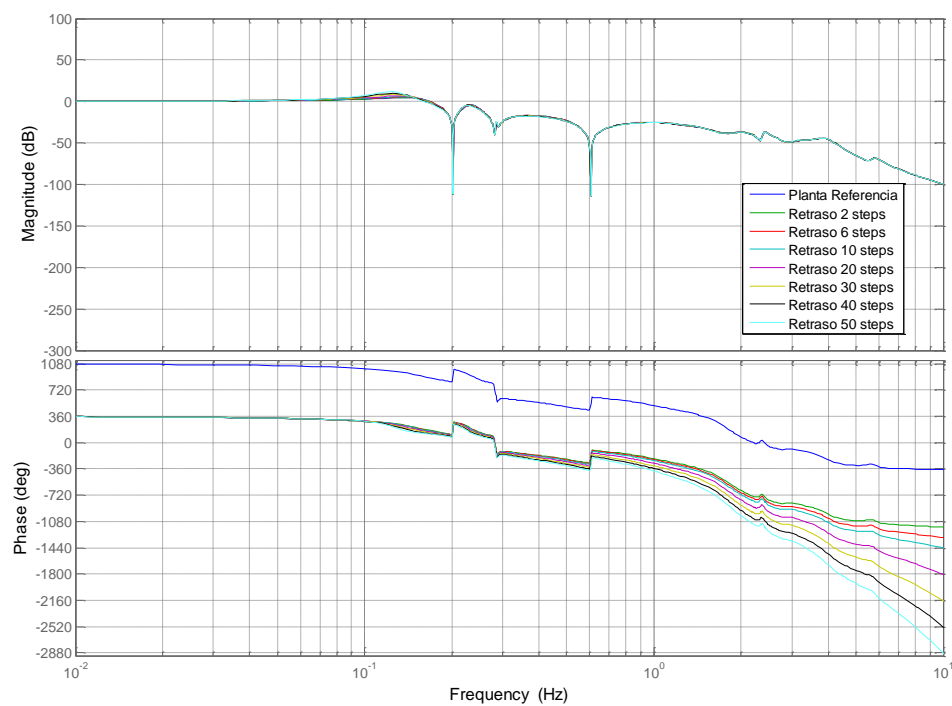
| Retraso 2 steps en el lazo de pitch |           |          |             |           |              |           |                   |        |       |              |        |       |               |        |       |
|-------------------------------------|-----------|----------|-------------|-----------|--------------|-----------|-------------------|--------|-------|--------------|--------|-------|---------------|--------|-------|
| Viento [m/s]                        | OPEN LOOP |          | CLOSED LOOP |           |              |           | RESPUESTA ESCALÓN |        |       |              |        |       |               |        |       |
|                                     |           |          | Tracking    |           | Sensibilidad |           | Tracking          |        |       | Sensibilidad |        |       | Efecto viento |        |       |
|                                     | MG [dB]   | MF [deg] | WB [dB]     | Pico [dB] | WB [dB]      | Pico [dB] | Mp                | Ts [s] | t [s] | Mp           | Ts [s] | t [s] | Mp            | Ts [s] | t [s] |
| 13                                  | 5.32      | 39.6     | 0.1756      | 4.785     | 0.07273      | 6.902     | 1.34              | 15.01  | 2.06  | 1.10         | 14.69  | 2.61  | 3.10          | 35.27  | 12.19 |
| 19                                  | 6.45      | 57.9     | 0.1773      | 2.373     | 0.0859       | 5.349     | 1.10              | 14.82  | 2.38  | 1.10         | 14.83  | 3.23  | 26.36         | 45.71  | 25.12 |
| 25                                  | 9.29      | 96.6     | 0.03685     | -1.757    | 0.07573      | 4.490     | -                 | 19.27  | 9.39  | 1.09         | 19.57  | 10.31 | 28.94         | 61.85  | 33.74 |

| Retraso 6 steps en el lazo de pitch |           |          |             |           |              |           |                   |        |       |              |        |       |               |        |       |
|-------------------------------------|-----------|----------|-------------|-----------|--------------|-----------|-------------------|--------|-------|--------------|--------|-------|---------------|--------|-------|
| Viento [m/s]                        | OPEN LOOP |          | CLOSED LOOP |           |              |           | RESPUESTA ESCALÓN |        |       |              |        |       |               |        |       |
|                                     |           |          | Tracking    |           | Sensibilidad |           | Tracking          |        |       | Sensibilidad |        |       | Efecto viento |        |       |
|                                     | MG [dB]   | MF [deg] | WB [dB]     | Pico [dB] | WB [dB]      | Pico [dB] | Mp                | Ts [s] | t [s] | Mp           | Ts [s] | t [s] | Mp            | Ts [s] | t [s] |
| 13                                  | 5.05      | 38.1     | 0.1753      | 5.275     | 0.072        | 7.575     | 1.36              | 15.20  | 2.03  | 1.11         | 15.13  | 2.84  | 22.64         | 37.69  | 12.75 |
| 19                                  | 6.15      | 56.5     | 0.1771      | 2.738     | 0.07963      | 5.771     | 1.12              | 14.93  | 2.34  | 1.10         | 14.98  | 3.24  | 26.70         | 54.09  | 25.07 |
| 25                                  | 8.95      | 95.8     | 0.03764     | -1.499    | 0.7444       | 3.633     | -                 | 19.31  | 9.37  | 1.10         | 19.64  | 10.32 | 29.22         | 65.5   | 33.76 |

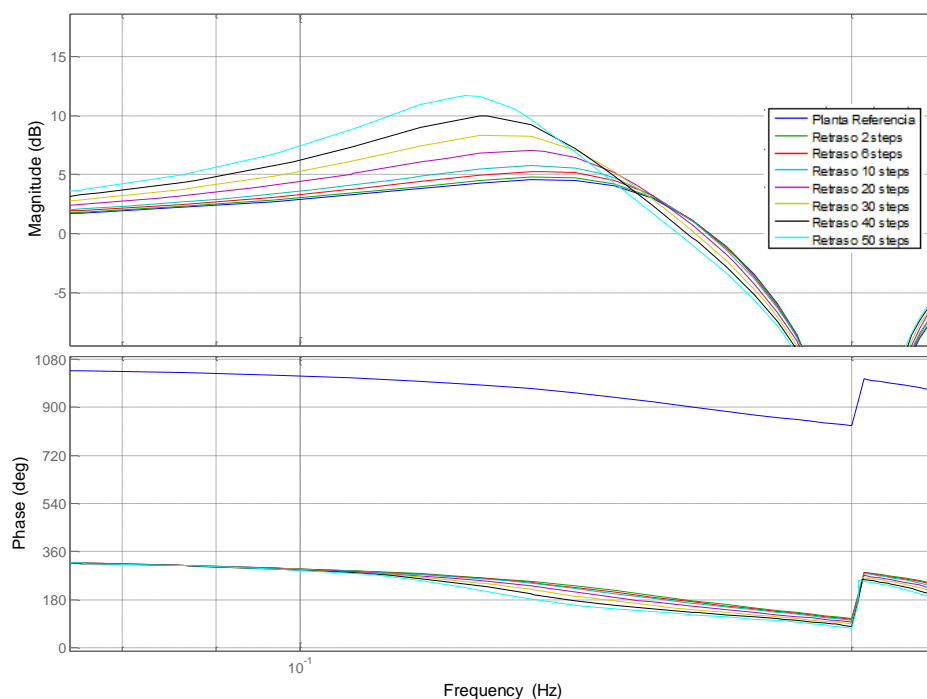
| Retraso 10 steps en el lazo de pitch |           |          |             |           |              |           |                   |        |       |              |        |       |               |        |       |
|--------------------------------------|-----------|----------|-------------|-----------|--------------|-----------|-------------------|--------|-------|--------------|--------|-------|---------------|--------|-------|
| Viento [m/s]                         | OPEN LOOP |          | CLOSED LOOP |           |              |           | RESPUESTA ESCALÓN |        |       |              |        |       |               |        |       |
|                                      |           |          | Tracking    |           | Sensibilidad |           | Tracking          |        |       | Sensibilidad |        |       | Efecto viento |        |       |
|                                      | MG [dB]   | MF [deg] | WB [dB]     | Pico [dB] | WB [dB]      | Pico [dB] | Mp                | Ts [s] | t [s] | Mp           | Ts [s] | t [s] | Mp            | Ts [s] | t [s] |
| 13                                   | 4.78      | 36.6     | 0.1749      | 5.75      | 0.07129      | 7.575     | 1.38              | 15.42  | 2.01  | 1.12         | 15.42  | 2.86  | 22.96         | 37.88  | 12.77 |
| 19                                   | 5.87      | 55       | 0.1769      | 3.109     | 0.07863      | 6.03      | 1.13              | 15.04  | 2.32  | 1.11         | 15.14  | 3.24  | 27.04         | 54.27  | 25.10 |
| 25                                   | 8.64      | 94.9     | 0.03855     | -1.256    | 0.07325      | 3.762     | -                 | 19.35  | 9.36  | 1.10         | 19.71  | 10.34 | 29.50         | 62.14  | 33.79 |

## ANEXO II

### Punto de operación A 13 m/s



Sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)



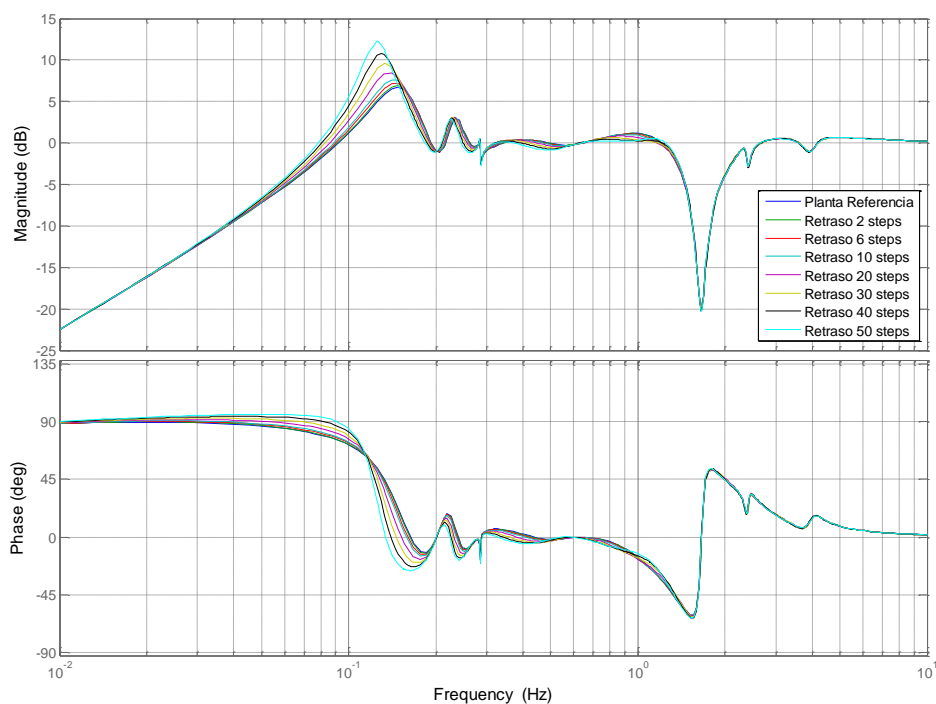
Zoom sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)

### Sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)

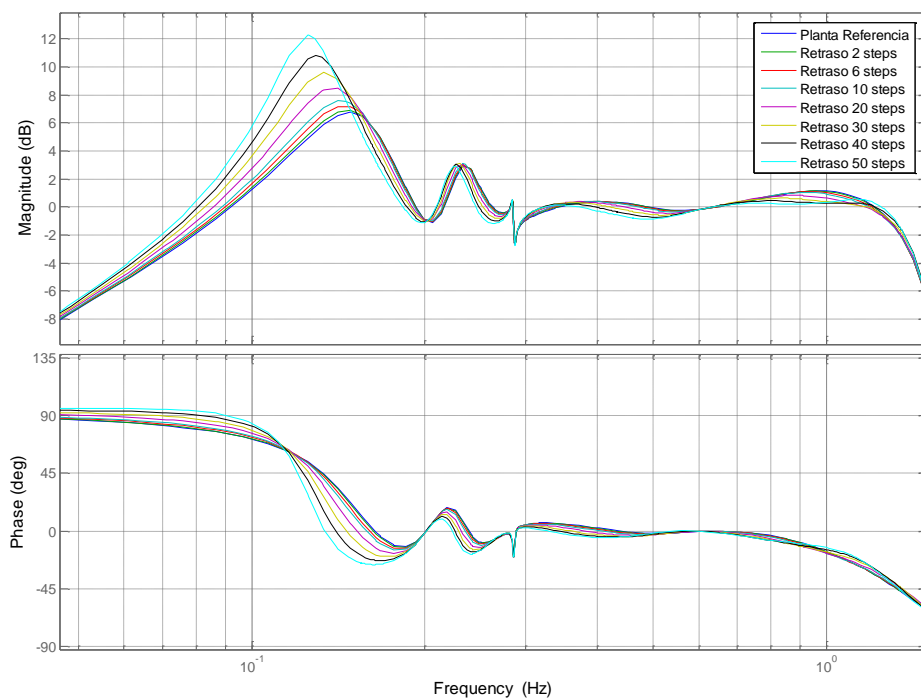
| Retraso    | WB [Hz] | Pico [dB] |
|------------|---------|-----------|
| Referencia | 0.1757  | 4.55      |
| 2 steps    | 0.1756  | 4.79      |
| 6 steps    | 0.1753  | 5.28      |
| 10 steps   | 0.1749  | 5.75      |
| 20 steps   | 0.1740  | 7.01      |
| 30 steps   | 0.1727  | 8.33      |
| 40 steps   | 0.1713  | 9.97      |
| 50 steps   | 0.1697  | 11.72     |

Se observa que el valor del ancho de banda disminuye conforme aumenta el número de retrasos que se introducen en el sistema. Es decir, el sistema se va desplazando a la izquierda al añadirle retrasos. Esto provoca que el sistema reaccione más lento y, por tanto, siga peor la referencia de velocidad del generador.

A su vez, se aprecia que el pico es más elevado al añadir retrasos, por lo que el amortiguamiento es menor. Por tanto, cuantos más retrasos tenga el sistema, más va a oscilar a la frecuencia donde se encuentra el pico.



**Sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol**

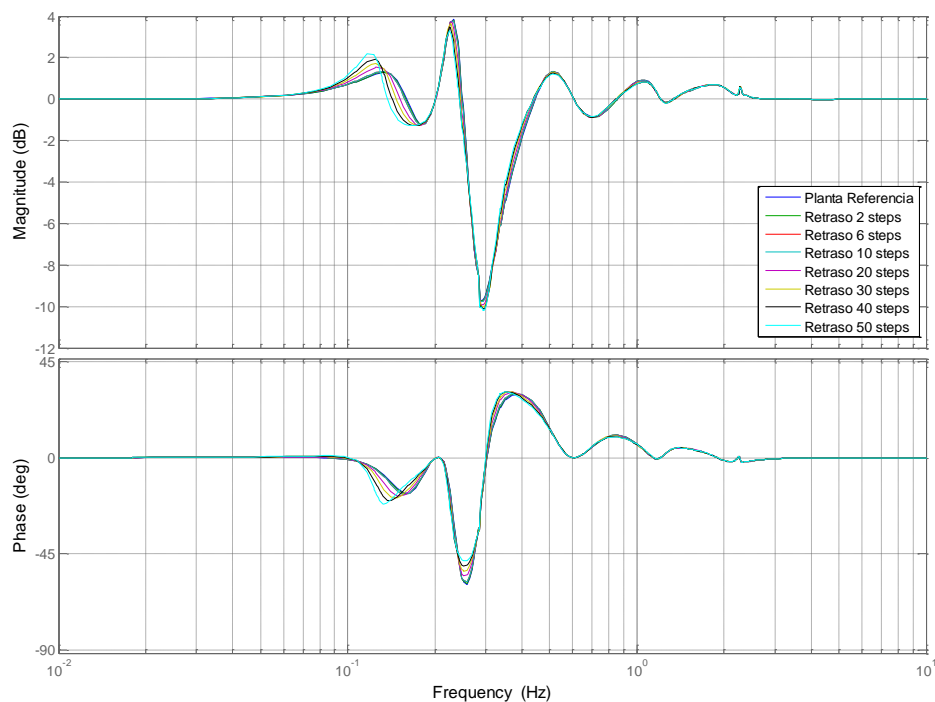


**Zoom sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol**

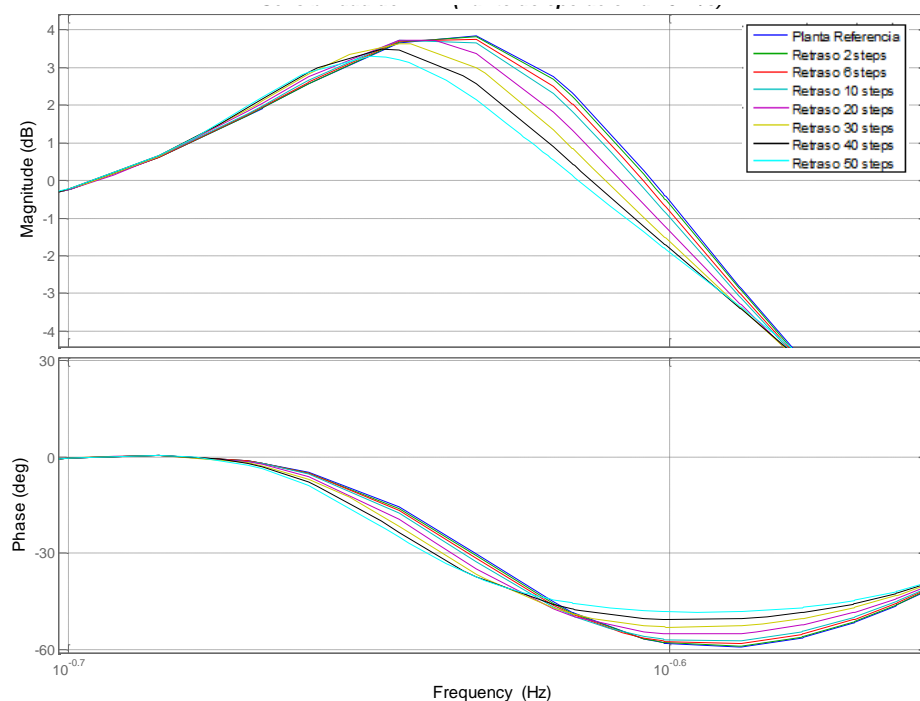
| Sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol<br>(Punto de operación a 13 m/s) |         |           |
|---|---------|-----------|
| Retraso   | WB [Hz] | Pico [dB] |
| Referencia  | 0.0731  | 6.75      |
| 2 steps   | 0.0727  | 6.90      |
| 6 steps   | 0.0720  | 7.19      |
| 10 steps  | 0.0713  | 7.58      |
| 20 steps  | 0.0696  | 8.47      |
| 30 steps  | 0.0681  | 9.60      |
| 40 steps  | 0.0666  | 10.80     |
| 50 steps  | 0.0653  | 12.25     |

Se observa que el valor del ancho de banda disminuye conforme aumenta el número de retrasos que se introducen en el sistema. Es decir, el sistema se va desplazando a la izquierda al añadirle retrasos. Esto provoca que ante perturbaciones externas, el sistema con un mayor número de retrasos sea más sensible, y por tanto, sea menos estable o robusto a dichas perturbaciones.

A su vez, se aprecia que el pico es más elevado al añadir retrasos, por lo que el amortiguamiento es menor. Por tanto, cuantos más retrasos tenga el sistema, más va a oscilar a la frecuencia donde se encuentra el pico.



Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 13 m/s)



Zoom sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 13 m/s)

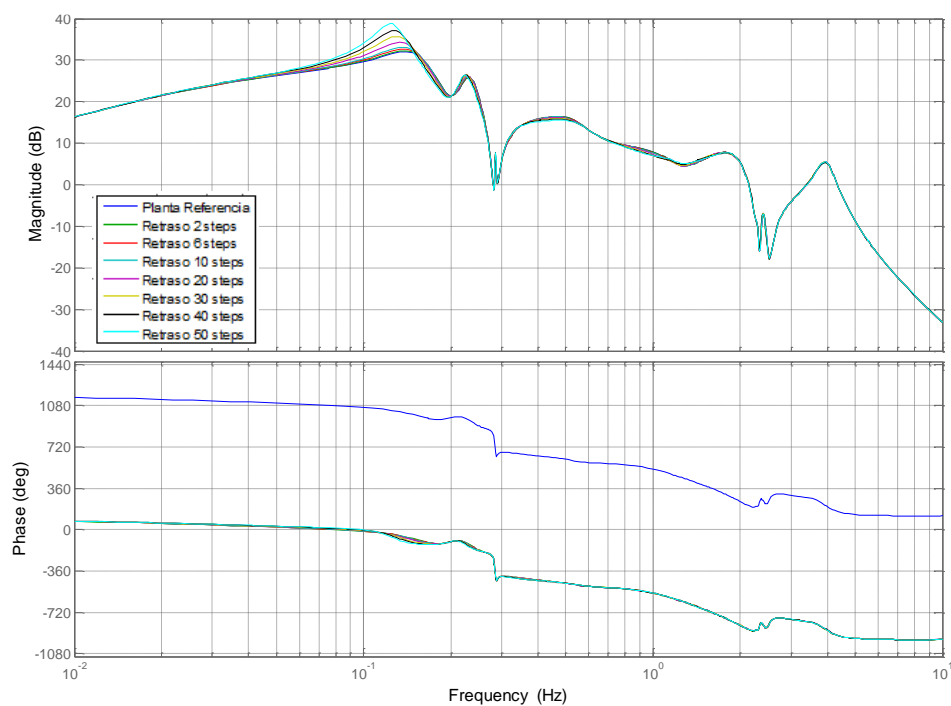


Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 13 m/s)

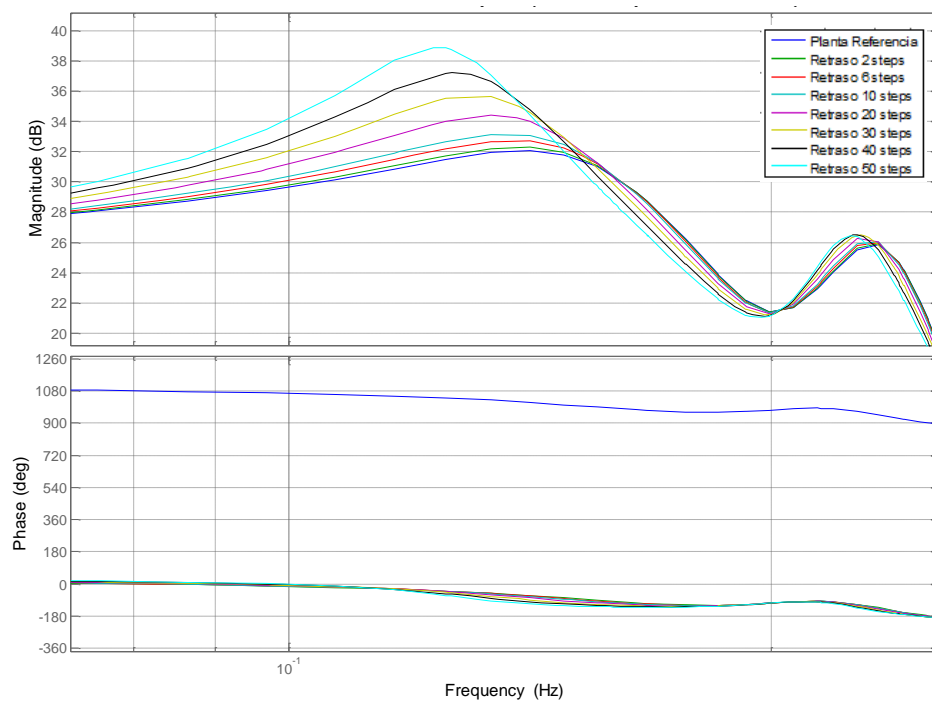
| Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD<br>(Punto de operación a 13 m/s) |         |           |
|--|---------|-----------|
| Retraso  | WB [Hz] | Pico [dB] |
| Referencia   | 0.259   | 3.84      |
| 2 steps  | 0.258   | 3.82      |
| 6 steps  | 0.258   | 3.77      |
| 10 steps   | 0.258   | 3.74      |
| 20 steps   | 0.257   | 3.72      |
| 30 steps   | 0.257   | 3.64      |
| 40 steps   | 0.256   | 3.48      |
| 50 steps   | 0.256   | 3.31      |

Se observa que el valor del ancho de banda disminuye conforme aumenta el número de retrasos que se introducen en el sistema. Sin embargo, su variación es menor respecto a la sensibilidad del scontrol. El hecho de este desplazamiento hacia la izquierda, provoca que ante perturbaciones externas, el sistema con un mayor número de retrasos sea más sensible, y por tanto, sea menos estable o robusto a dichas perturbaciones.

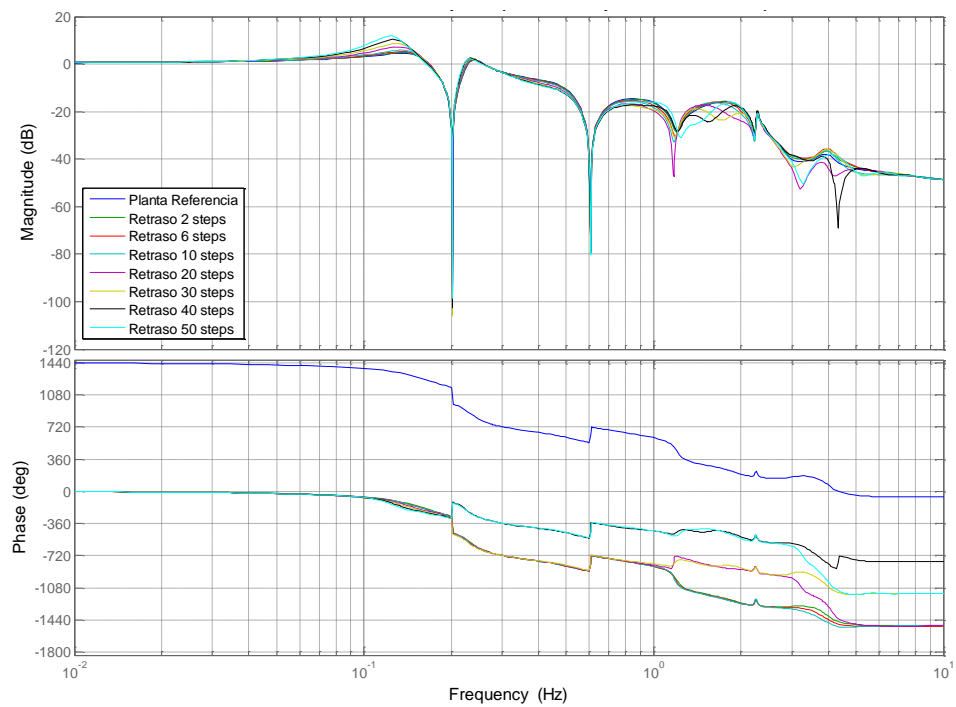
Al contrario que en el caso de la sensibilidad del scontrol, en el ATD, el pico va disminuyendo conforme aumenta el número de retrasos. Por tanto, se obtiene un mayor amortiguamiento provocando que el sistema oscile menos a la frecuencia donde se encuentra dicho pico.



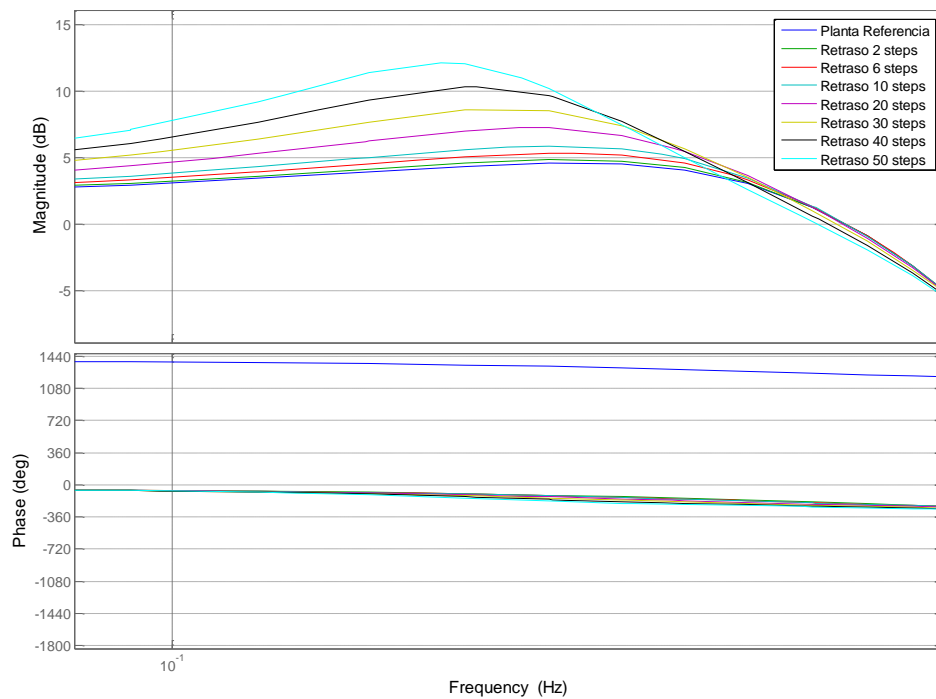
Efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 13 m/s)



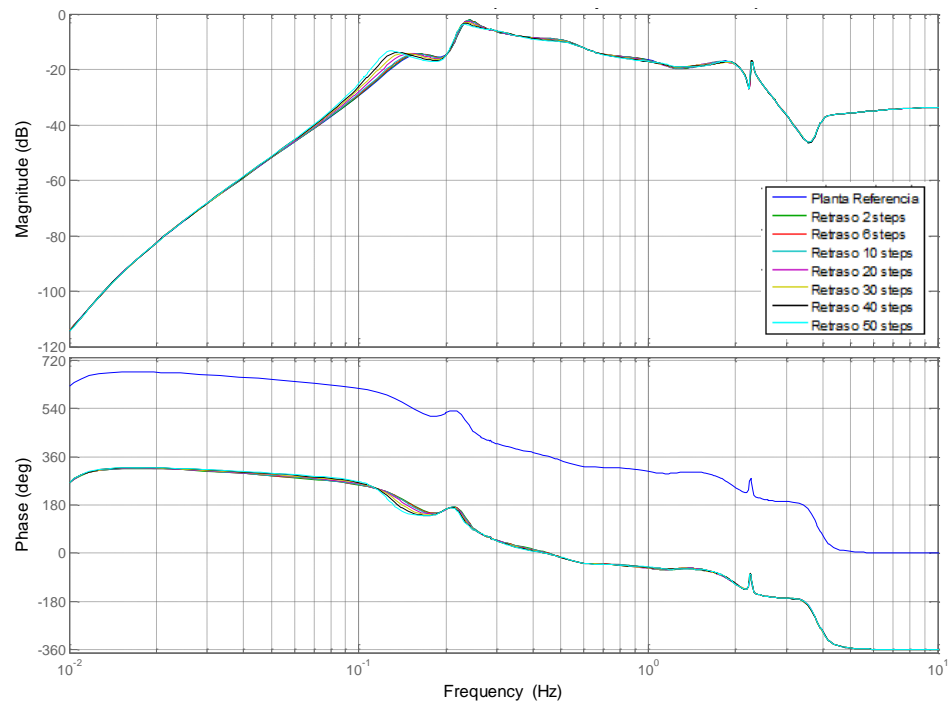
Zoom efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 13 m/s)



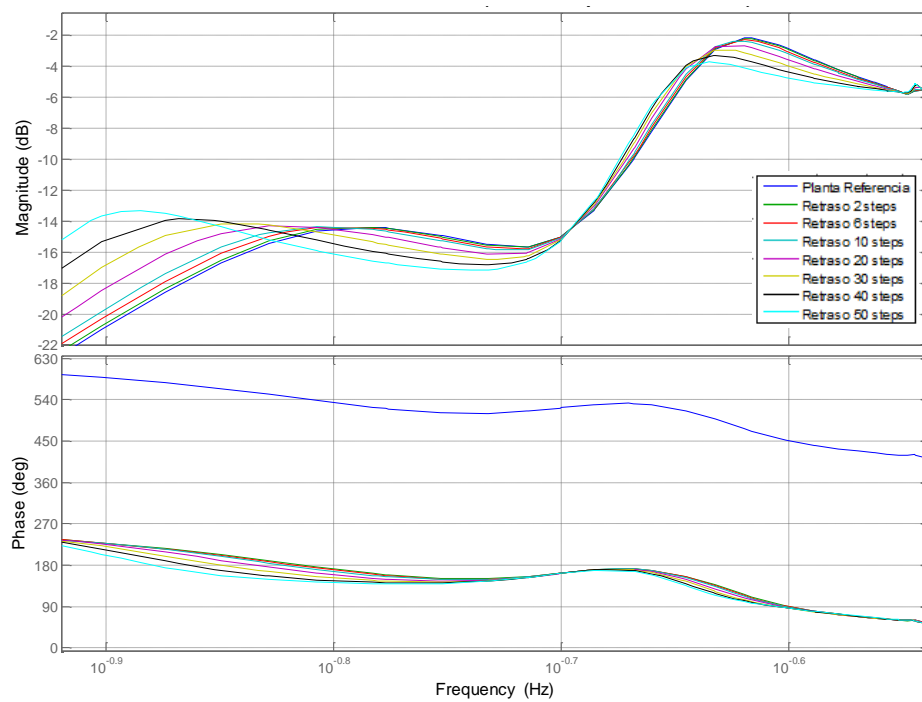
Efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 13 m/s)



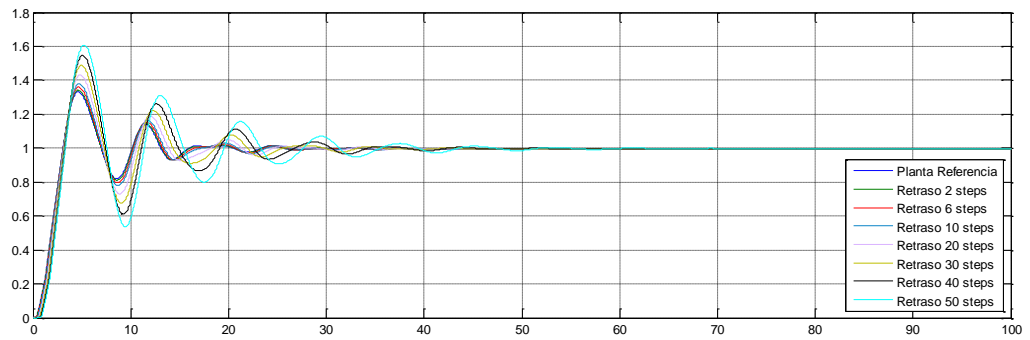
Zoom efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 13 m/s)



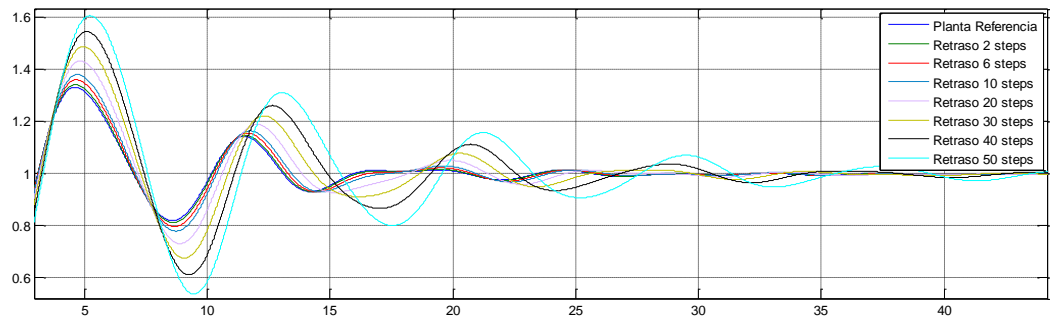
Efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación 13 m/s)



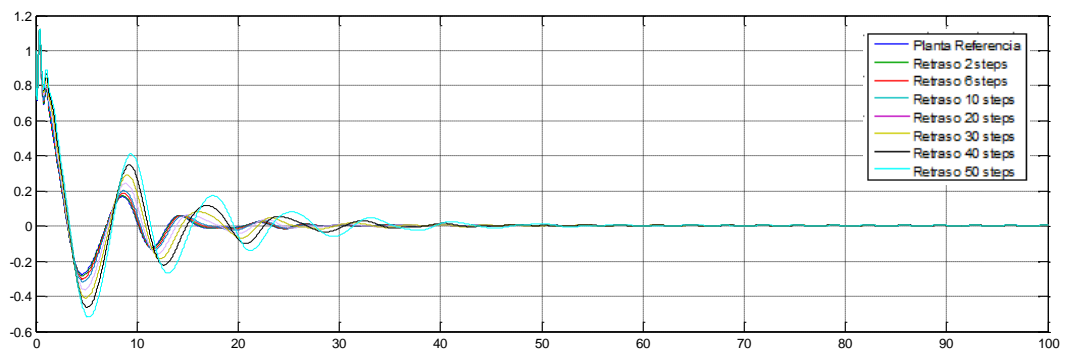
Efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación 13 m/s)



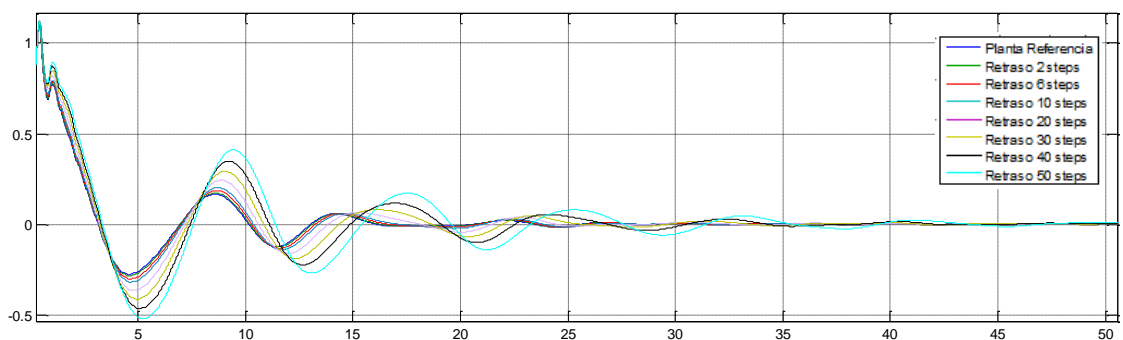
Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)



Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)



Respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)

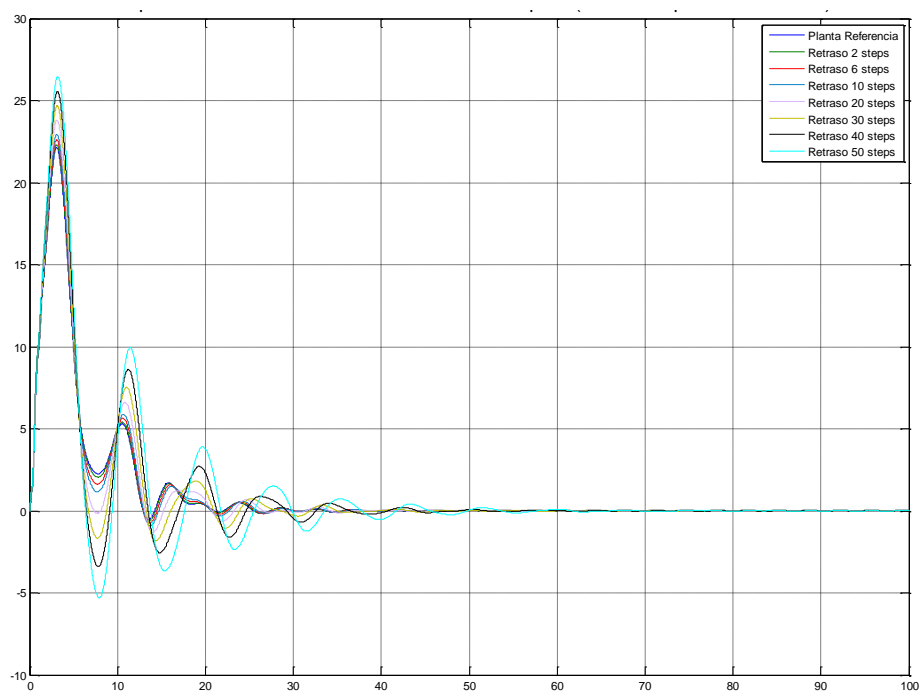


Zoom respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)

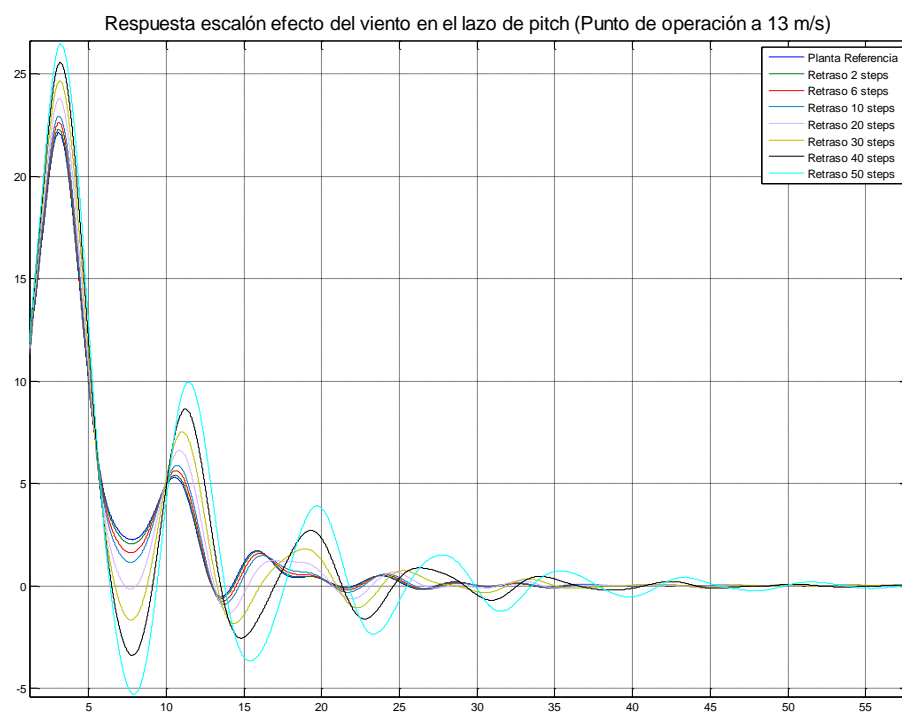
| Respuesta escalón sensibilidades del scontrol<br>(Punto de operación a 13 m/s) |                              |               |              |                          |               |
|--|------------------------------|---------------|--------------|--------------------------|---------------|
|  | DE SEGUIMIENTO DE REFERENCIA |               |              | RECHAZO A PERTURBACIONES |               |
| <b>Retraso</b>   | <b>Mp</b>                    | <b>Ts [s]</b> | <b>t [s]</b> | <b>Mp</b>                | <b>Ts [s]</b> |
| <b>Referencia</b>  | 1.33                         | 14.93         | 2.07         | 1.106                    | 14.77         |
| <b>2 steps</b>   | 1.34                         | 15.01         | 2.06         | 1.109                    | 14.86         |
| <b>6 steps</b>   | 1.36                         | 15.20         | 2.03         | 1.113                    | 15.06         |
| <b>10 steps</b>  | 1.38                         | 15.42         | 2.01         | 1.116                    | 15.32         |
| <b>20 steps</b>  | 1.43                         | 20.07         | 1.96         | 1.119                    | 16.24         |
| <b>30 steps</b>  | 1.49                         | 23.66         | 1.91         | 1.120                    | 21.11         |
| <b>40 steps</b>  | 1.55                         | 25.11         | 1.88         | 1.121                    | 24.69         |
| <b>50 steps</b>  | 1.61                         | 33.48         | 1.84         | 1.121                    | 30.18         |

En cuanto a la sensibilidad de seguimiento de referencia, se observa cómo el sobreimpulso (Mp) aumenta conforme el número de retrasos es mayor. Lo mismo sucede con el tiempo de estabilización (Ts), lo cual coincide con lo que se ha visto anteriormente cuando se analizaba el ancho de banda. El tiempo de estabilización aumenta ya que el sistema es más lento con retrasos para seguir la referencia.

Se ve reflejada la misma situación en el caso de la sensibilidad de rechazo a perturbaciones. Cabe destacar que el sobreimpulso aumenta pero en menor medida que en la sensibilidad de seguimiento de referencia. El tiempo de estabilización también aumenta conforme aumenta el número de retrasos, al tratarse de un sistema menos rápido.



**Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 13 m/s)**

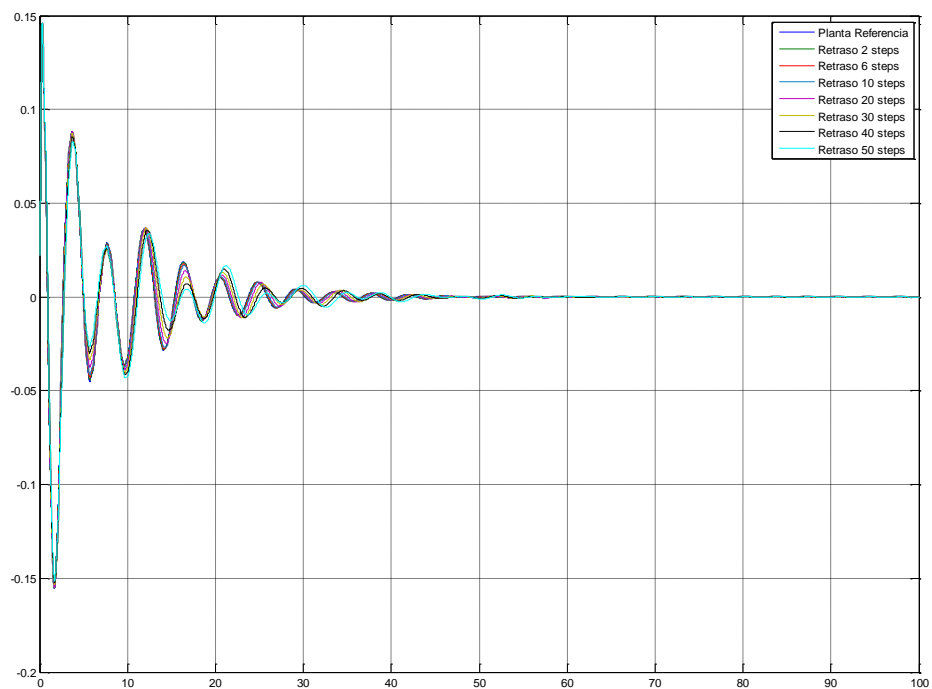


**Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 13 m/s)**

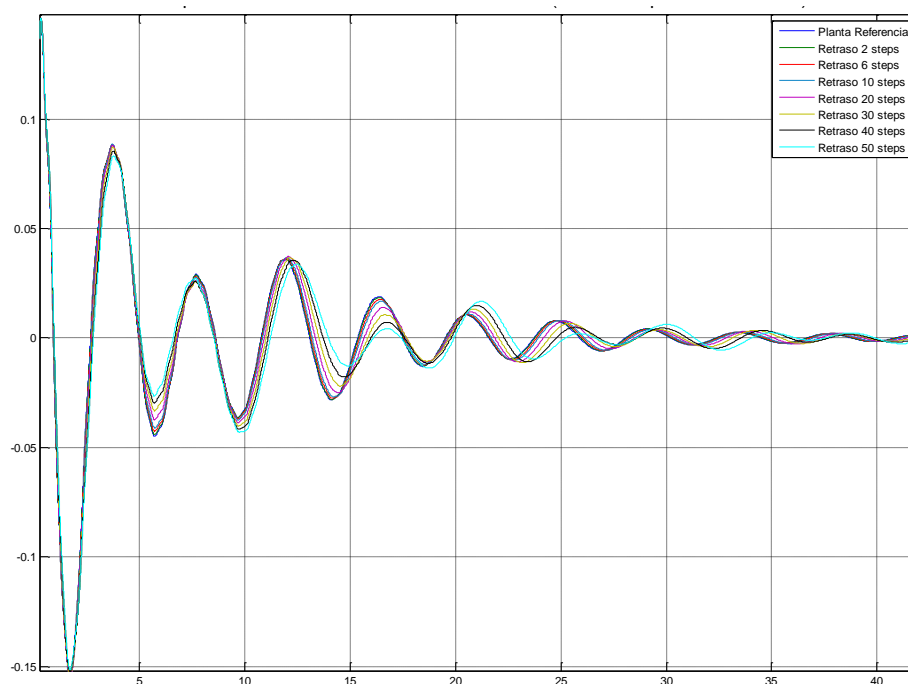
| Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador<br>(Punto de operación a 13 m/s) |       |        |
|---|-------|--------|
| Retraso   | Mp    | Ts [s] |
| Referencia  | 22.14 | 37.39  |
| 2 steps   | 22.30 | 37.47  |
| 6 steps   | 22.63 | 37.63  |
| 10 steps  | 22.96 | 37.78  |
| 20 steps  | 23.81 | 36.28  |
| 30 steps  | 24.68 | 45.43  |
| 40 steps  | 25.57 | 51.35  |
| 50 steps  | 26.47 | 63.81  |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído de las respuestas escalón de las sensibilidades del scontrol.





Respuesta escalón efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación a 13 m/s)

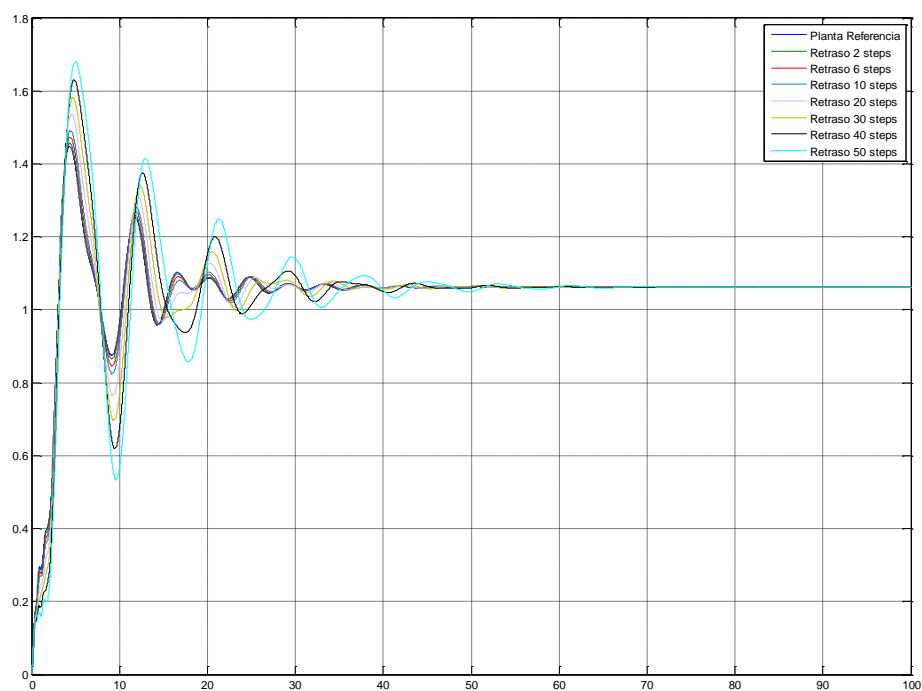


Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación a 13 m/s)

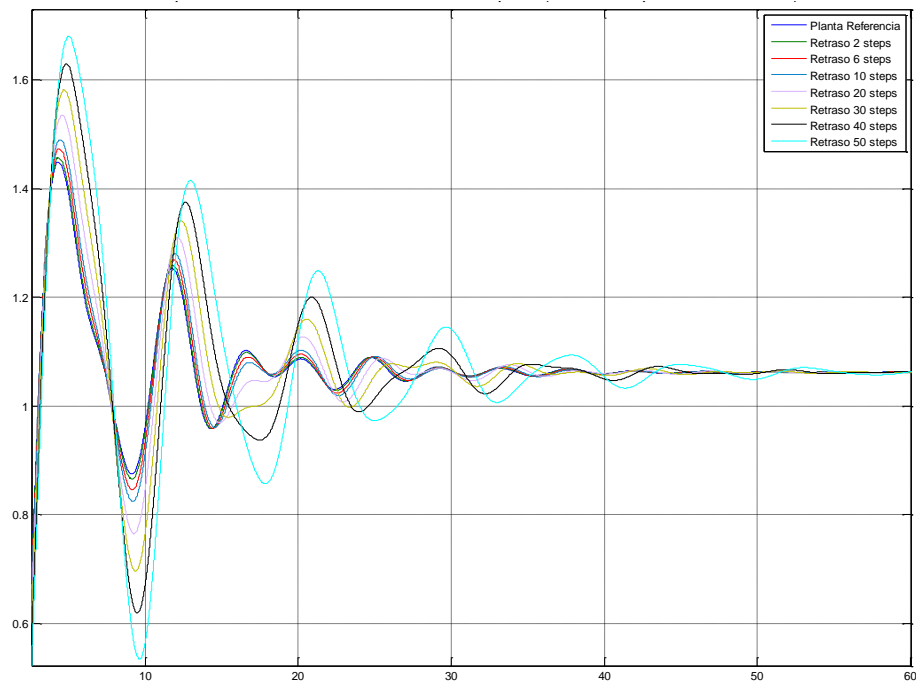
### Respuesta escalón efecto del viento en la aceleración de la torre (Punto de operación a 13 m/s)

| Retraso    | Mp     | Ts [s] |
|------------|--------|--------|
| Referencia | 0.1454 | 4.45   |
| 2 steps    | 0.1455 | 4.45   |
| 6 steps    | 0.1457 | 4.46   |
| 10 steps   | 0.1459 | 4.46   |
| 20 steps   | 0.1460 | 4.48   |
| 30 steps   | 0.1460 | 4.49   |
| 40 steps   | 0.1460 | 4.49   |
| 50 steps   | 0.1460 | 4.49   |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído de las respuestas escalón de las sensibilidades del scontrol.



Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 13 m/s)

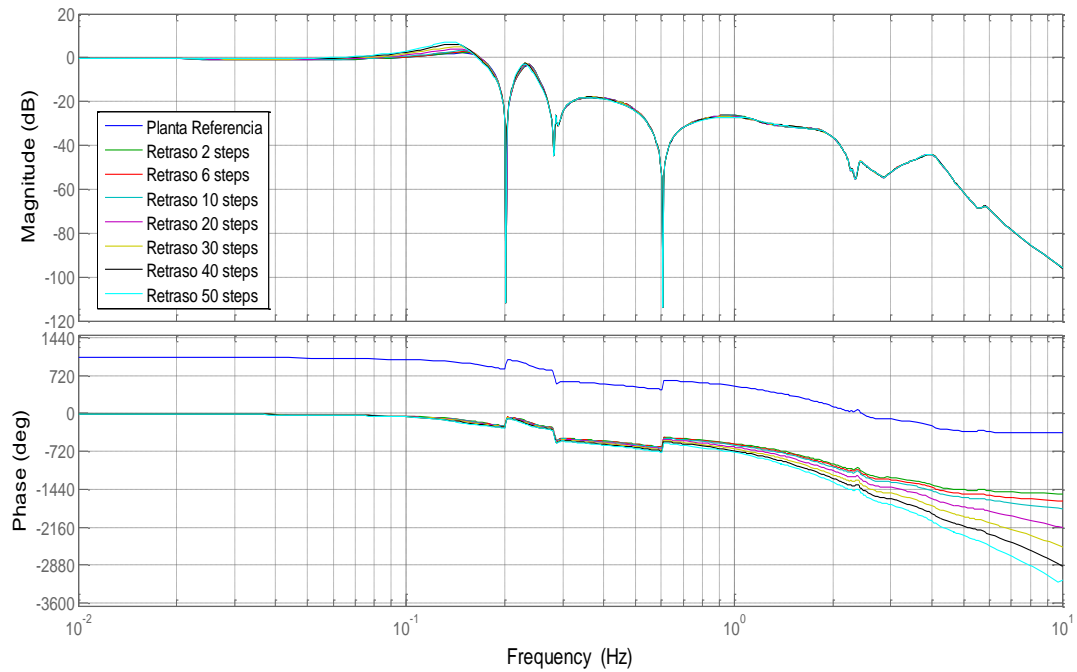


Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 13 m/s)

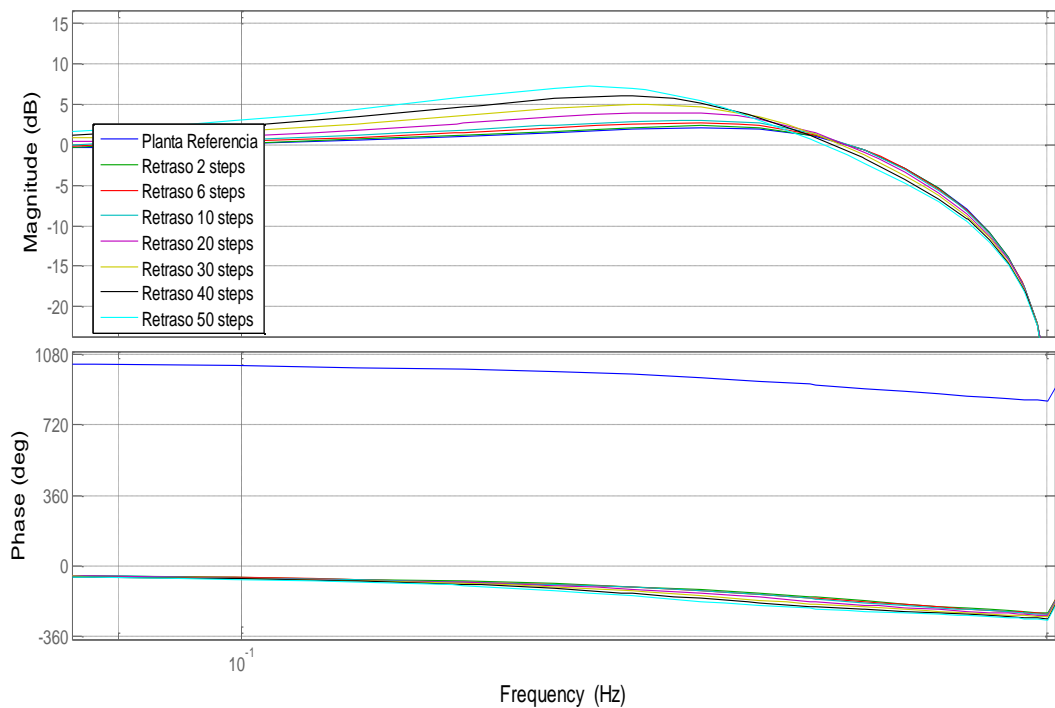
| Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch<br>(Punto de operación a 13 m/s) |      |        |
|---|------|--------|
| Retraso   | Mp   | Ts [s] |
| Referencia  | 1.45 | 12.81  |
| 2 steps   | 1.46 | 12.86  |
| 6 steps   | 1.47 | 12.96  |
| 10 steps  | 1.49 | 13.08  |
| 20 steps  | 1.54 | 13.39  |
| 30 steps  | 1.58 | 21.18  |
| 40 steps  | 1.63 | 21.91  |
| 50 steps  | 1.68 | 22.65  |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído de las respuestas escalón de las sensibilidades del scontrol.

## Punto de operación A 19m/s



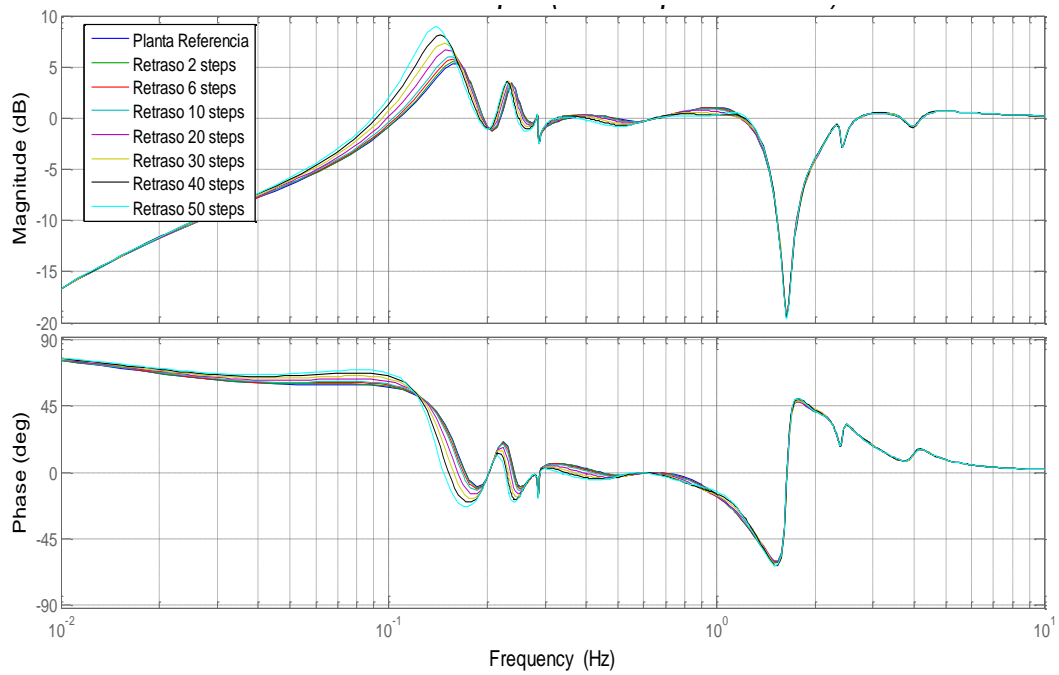
### Sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 19 m/s)



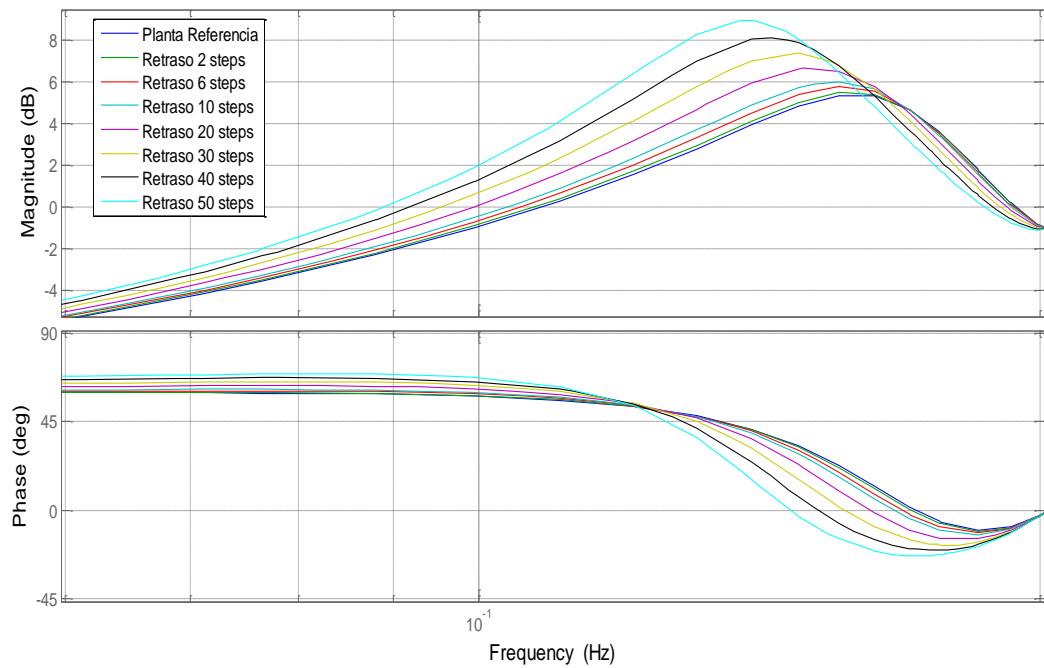
### Zoom sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 19 m/s)

| Sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol<br>(Punto de operación a 19 m/s) |         |           |
|---|---------|-----------|
| Retraso   | WB [Hz] | Pico [dB] |
| Referencia  | 0.177   | 2.19      |
| 2 steps   | 0.177   | 2.37      |
| 6 steps   | 0.177   | 2.73      |
| 10 steps  | 0.177   | 3.11      |
| 20 steps  | 0.176   | 3.99      |
| 30 steps  | 0.175   | 5.07      |
| 40 steps  | 0.174   | 6.12      |
| 50 steps  | 0.173   | 7.23      |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído para la sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 13 m/s). Cabe destacar que la variación del ancho de banda es menor en este punto de operación y que el pico también lo es. Por tanto, al tener menos pico en todos los casos, el amortiguamiento a 19 m/s será mayor que en el punto de operación a 13 m/s.



Sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 19 m/s)

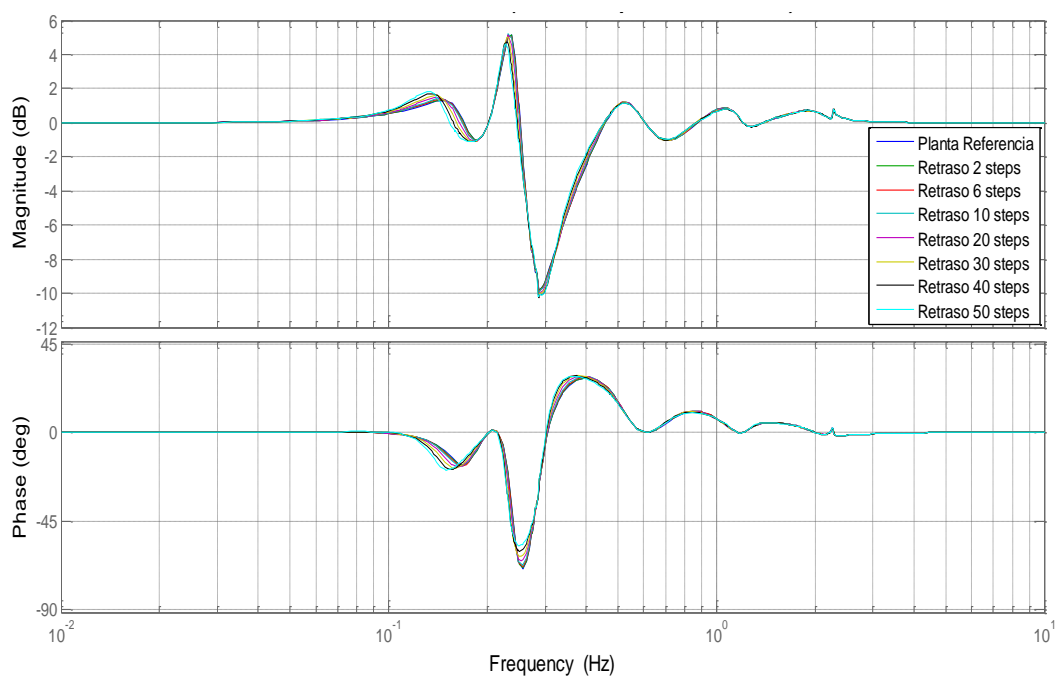


Zoom sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 19 m/s)

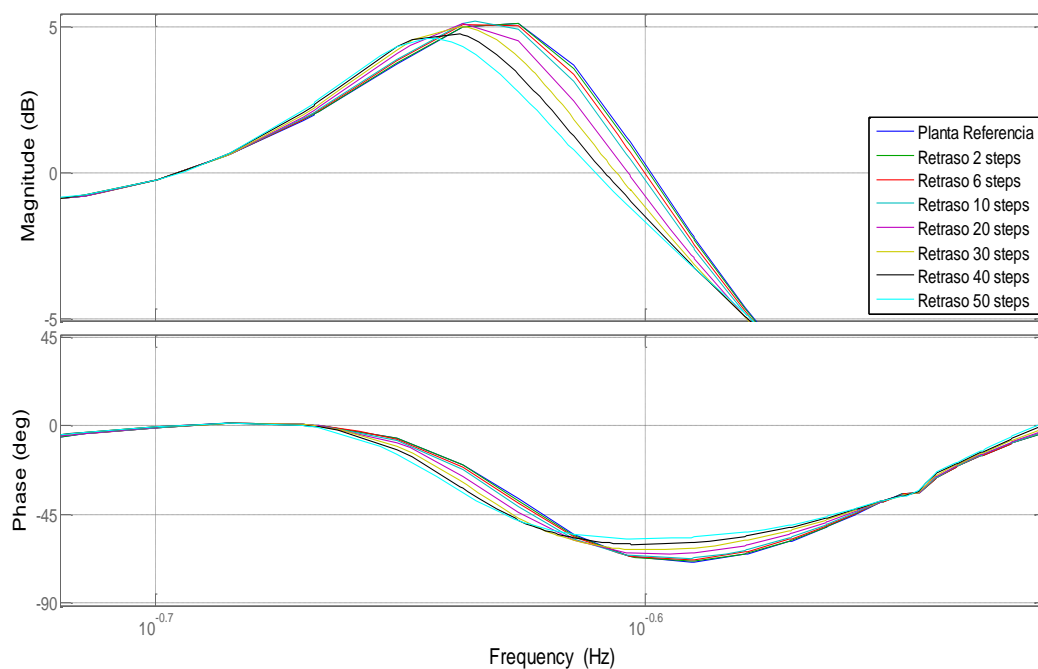
| Sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol<br>(Punto de operación a 19 m/s) |         |           |
|---|---------|-----------|
| Retraso   | WB [Hz] | Pico [dB] |
| Referencia  | 0.08114 | 5.34      |
| 2 steps   | 0.08058 | 5.49      |
| 6 steps   | 0.07963 | 5.77      |
| 10 steps  | 0.07861 | 6.03      |
| 20 steps  | 0.06960 | 6.66      |
| 30 steps  | 0.07390 | 7.38      |
| 40 steps  | 0.07178 | 8.14      |
| 50 steps  | 0.06979 | 8.95      |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído para la sensibilidad de rechazo a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 13 m/s).





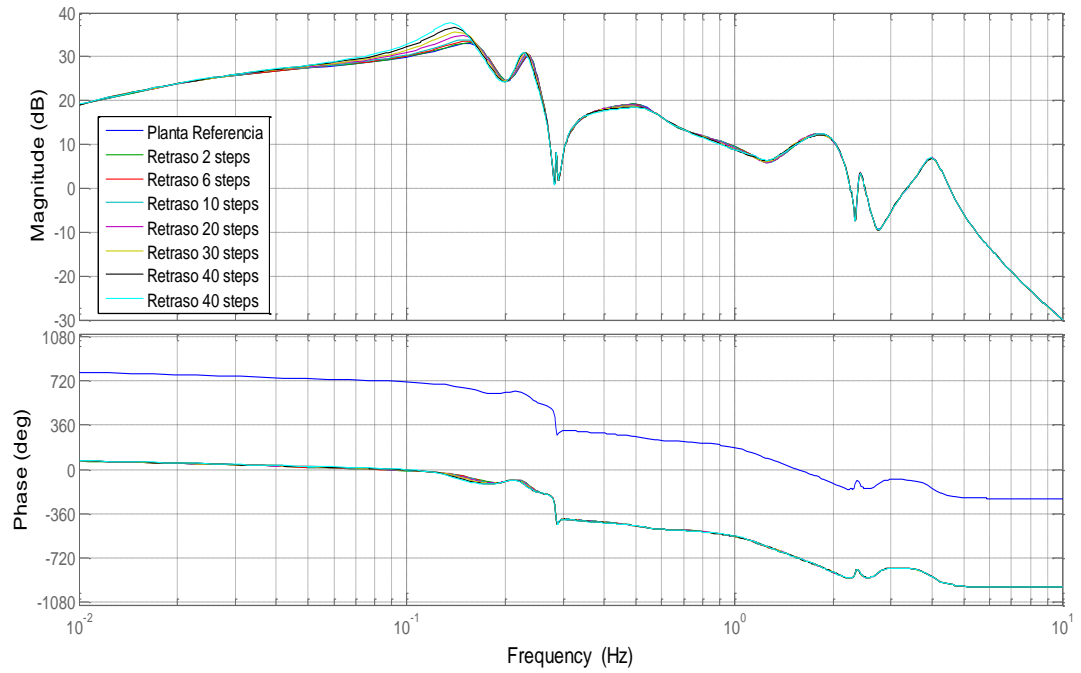
Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 19 m/s)



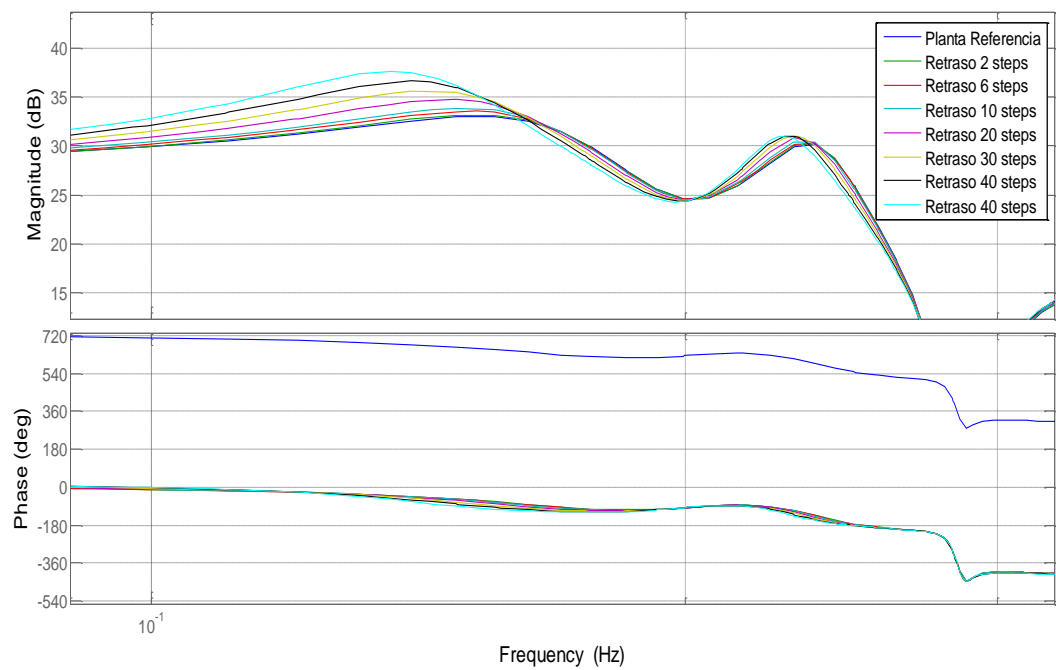
Zoom sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 19 m/s)

| Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD<br>(Punto de operación a 19 m/s) |         |           |
|--|---------|-----------|
| Retraso  | WB [dB] | Pico [dB] |
| Referencia   | 0.259   | 5.35      |
| 2 steps  | 0.259   | 5.32      |
| 6 steps  | 0.259   | 5.30      |
| 10 steps   | 0.258   | 5.25      |
| 20 steps   | 0.257   | 5.14      |
| 30 steps   | 0.257   | 5.03      |
| 40 steps   | 0.256   | 4.80      |
| 50 steps   | 0.256   | 4.61      |

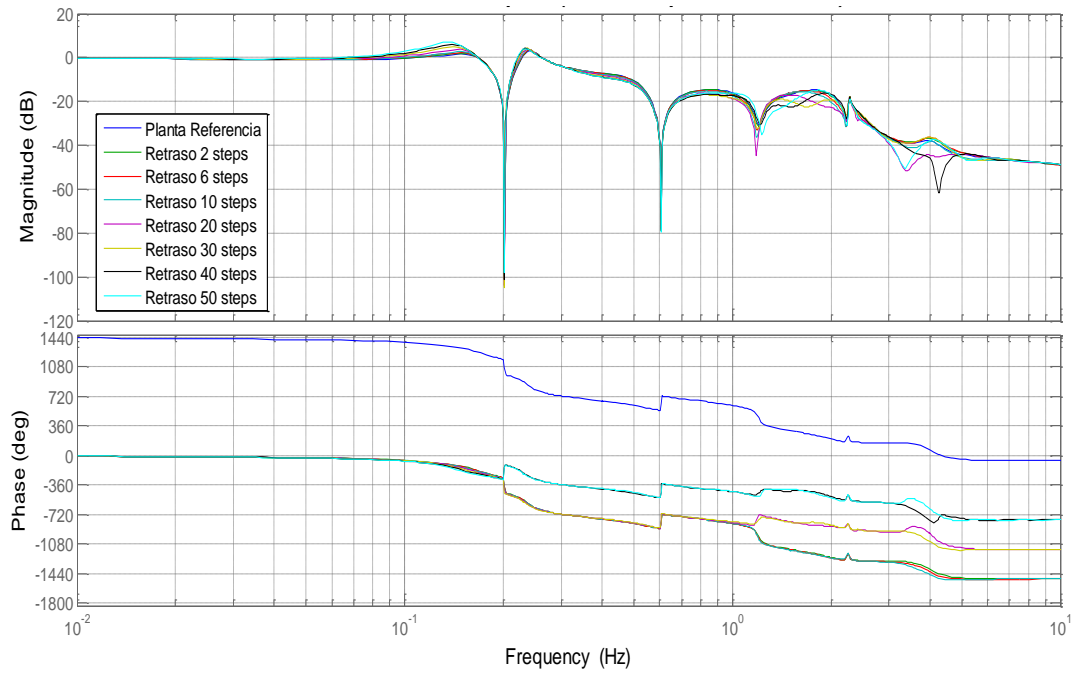
Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído para la sensibilidad de rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 13 m/s).



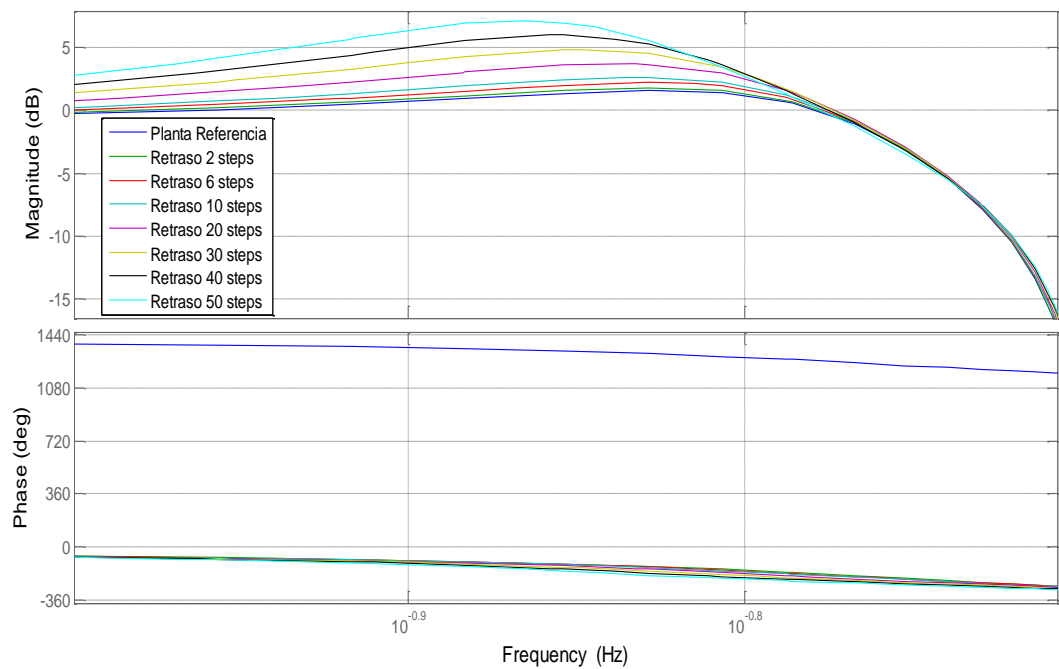
Efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)



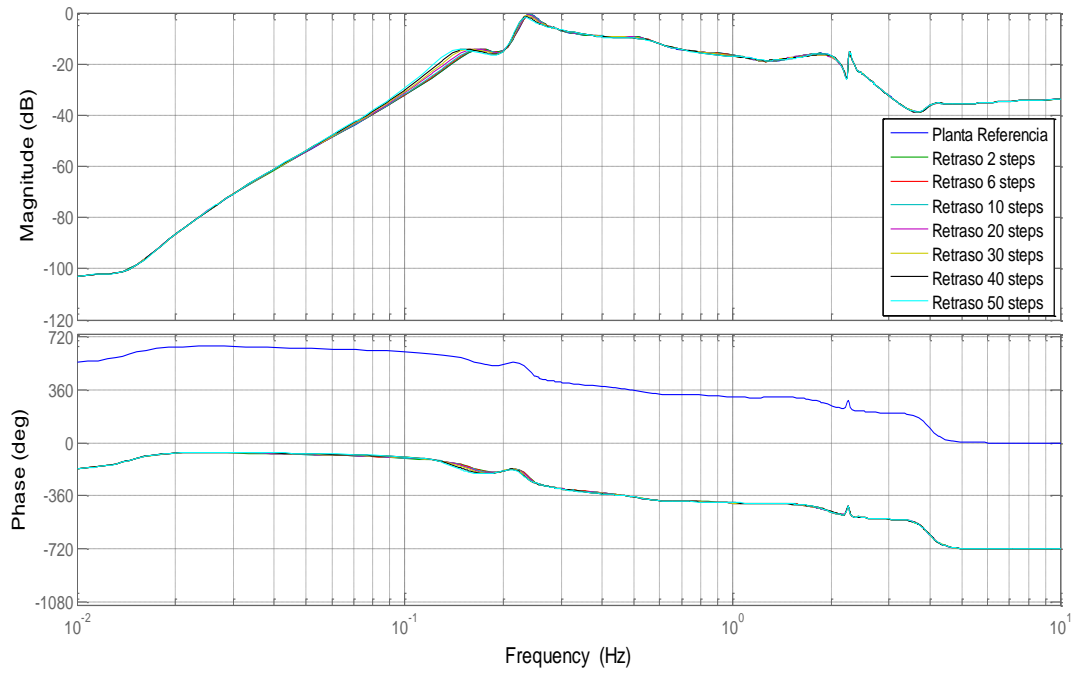
Zoom efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)



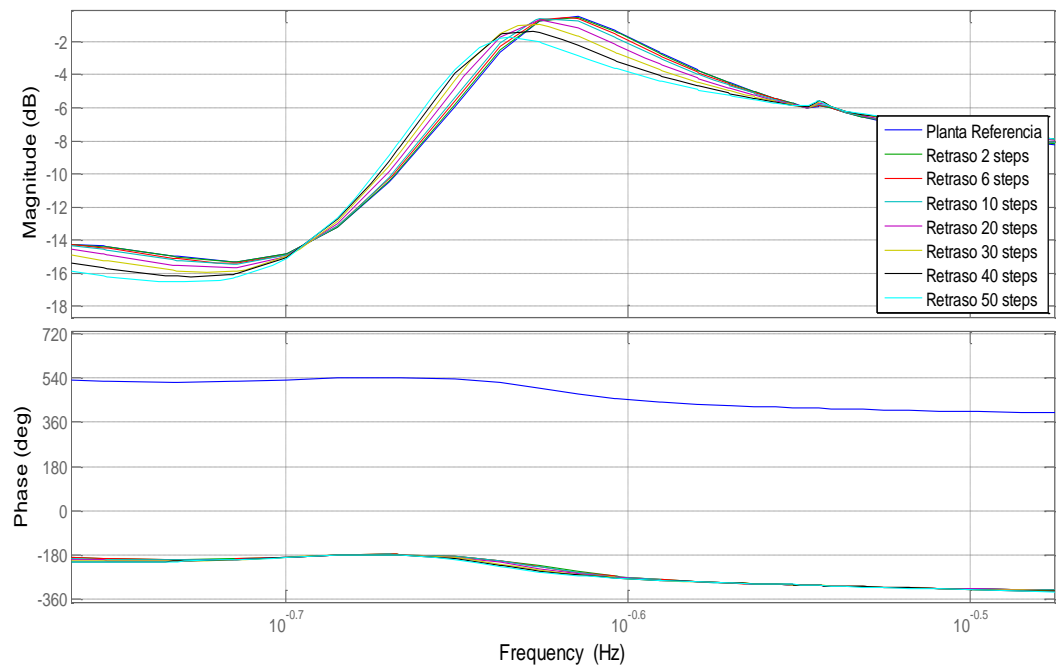
Efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 19 m/s)



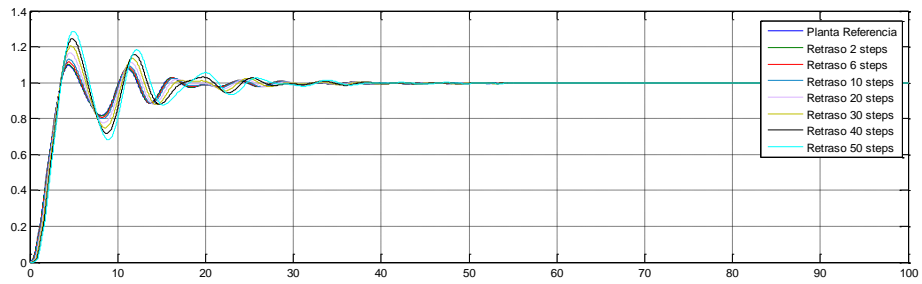
Zoom efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 19 m/s)



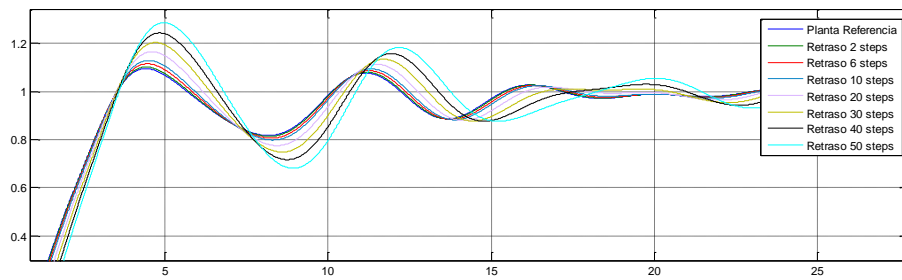
Efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s)



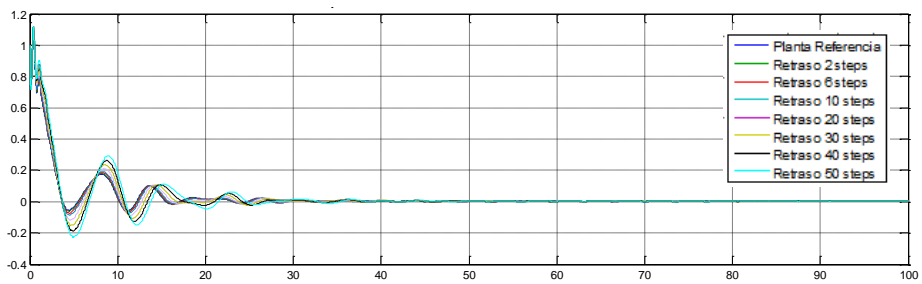
Zoom efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s)



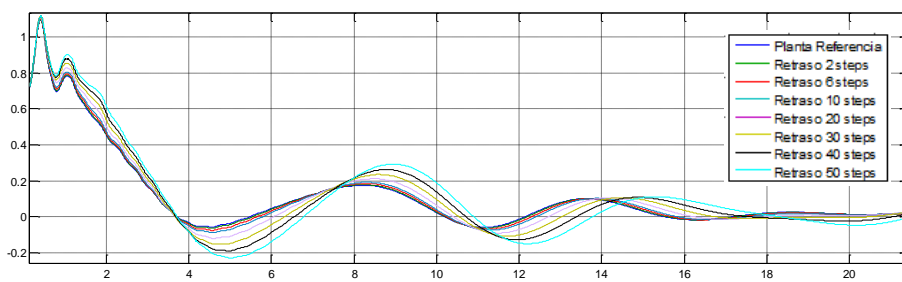
Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 19 m/s)



Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 19m/s)



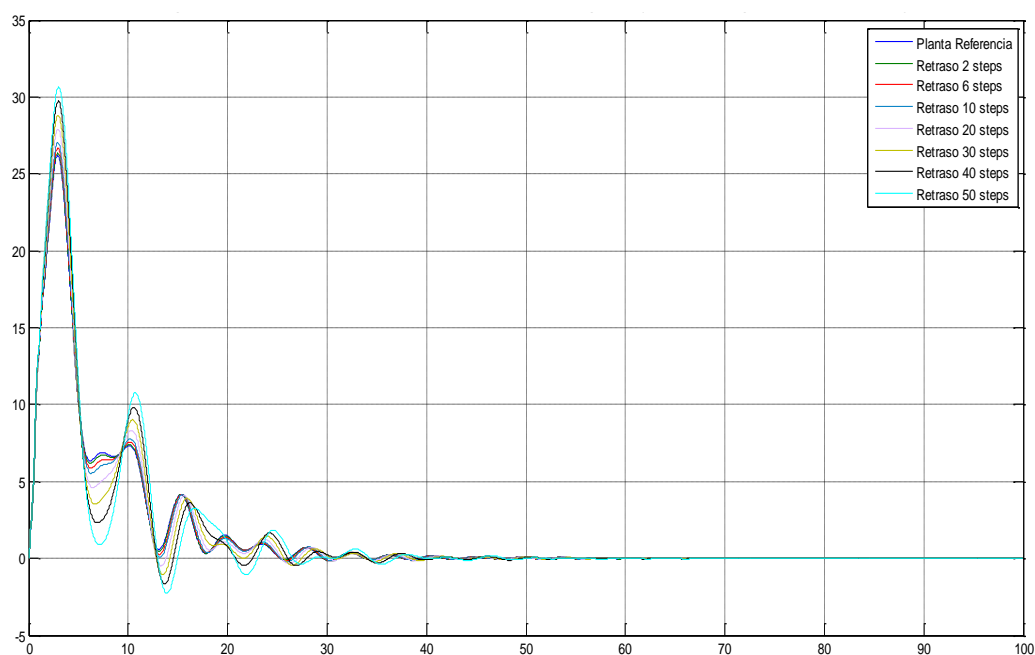
Respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 19 m/s)



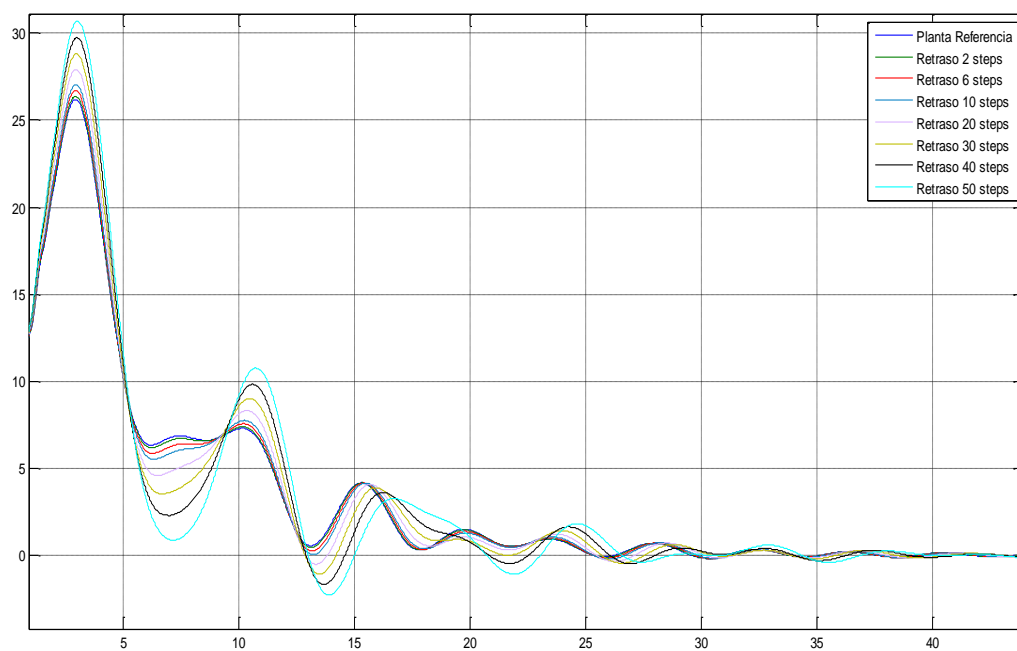
Zoom respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 13 m/s)

| Respuesta escalón sensibilidades del scontrol<br>(Punto de operación a 19 m/s) |                              |        |       |                          |        |
|--|------------------------------|--------|-------|--------------------------|--------|
|  | DE SEGUIMIENTO DE REFERENCIA |        |       | RECHAZO A PERTURBACIONES |        |
| Retraso  | Mp                           | Ts [s] | t [s] | Mp                       | Ts [s] |
| Referencia   | 1.10                         | 14.77  | 2.40  | 1.09                     | 14.75  |
| 2 steps  | 1.10                         | 14.82  | 2.40  | 1.10                     | 14.81  |
| 6 steps  | 1.12                         | 14.93  | 2.35  | 1.10                     | 14.92  |
| 10 steps   | 1.13                         | 15.04  | 2.36  | 1.11                     | 15.04  |
| 20 steps   | 1.17                         | 15.36  | 2.34  | 1.11                     | 15.38  |
| 30 steps   | 1.20                         | 15.74  | 2.28  | 1.12                     | 15.78  |
| 40 steps   | 1.24                         | 23.08  | 2.22  | 1.12                     | 22.98  |
| 50 steps   | 1.29                         | 23.77  | 2.18  | 1.12                     | 23.66  |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído para la respuesta escalón sensibilidades del scontrol (Punto de operación a 13 m/s). Cabe destacar que en este punto de operación se obtiene un menor tiempo de estabilización, aproximadamente de 10 segundos menos para el caso de seguimiento de referencia y de 7 segundos para el de rechazo a perturbaciones.



Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

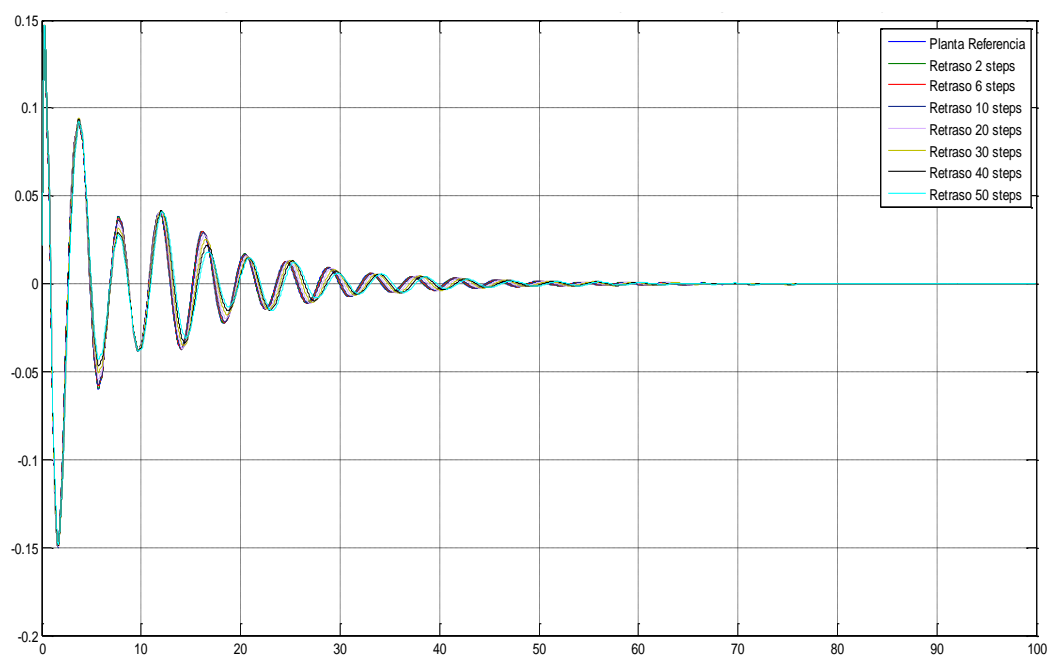


Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 19 m/s)

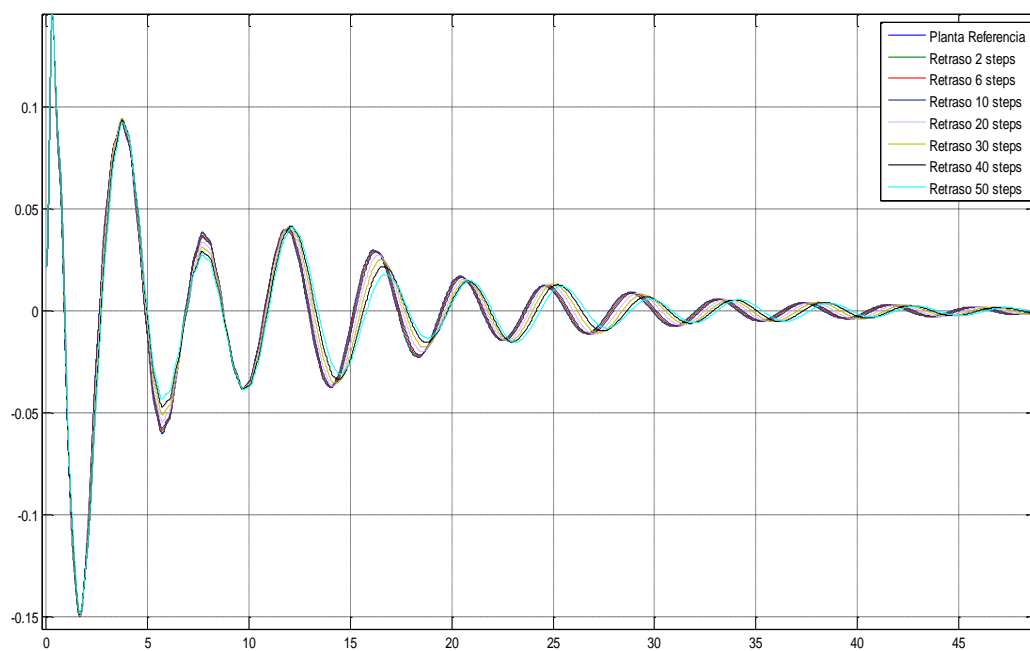


| Respuesta escalón efecto del viento en la velocidad del generador<br>(Punto de operación a 19 m/s) |       |        |
|--|-------|--------|
| Retraso  | Mp    | Ts [s] |
| Referencia   | 26.19 | 53.77  |
| 2 steps  | 26.36 | 53.85  |
| 6 steps  | 26.70 | 54.02  |
| 10 steps   | 27.04 | 54.16  |
| 20 steps   | 27.91 | 54.44  |
| 30 steps   | 28.81 | 54.49  |
| 40 steps   | 29.74 | 51.25  |
| 50 steps   | 30.68 | 51.04  |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído para la respuesta escalón efecto del viento en la velocidad del generador (Punto de operación a 13 m/s).



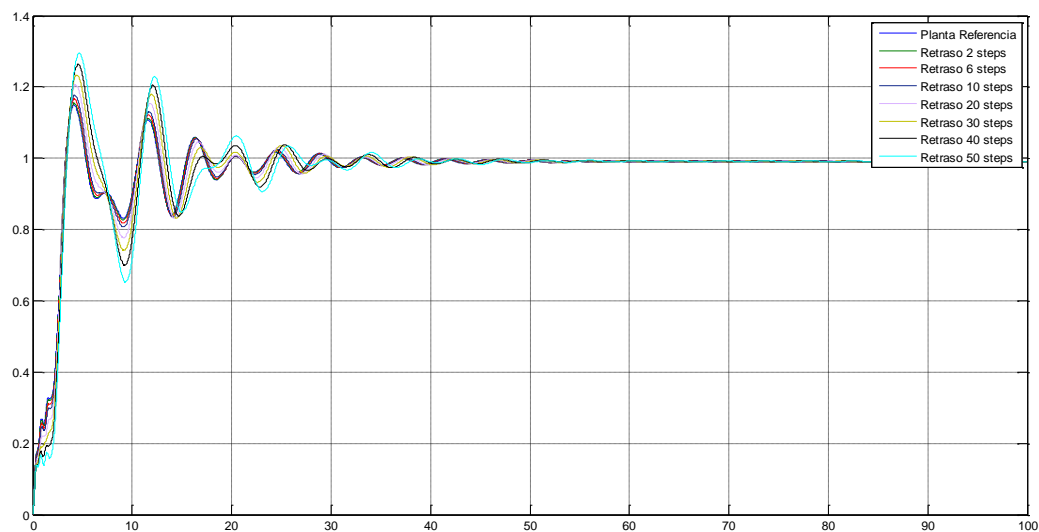
Respuesta escalón efecto del viento sobre aceleración de la torre (Punto de operación a 19 m/s)



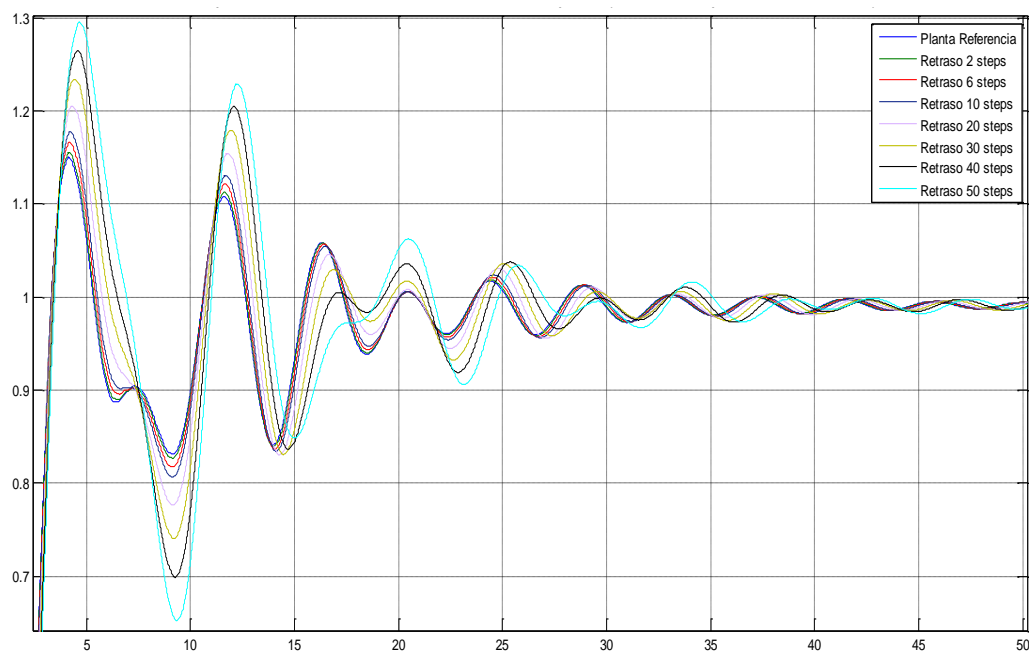
Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre aceleración de la torre (Punto de operación a 19m/s)

| Respuesta escalón efecto del viento en la aceleración de la torre<br>(Punto de operación a 19 m/s) |        |        |
|--|--------|--------|
| Retraso  | Mp     | Ts [s] |
| Referencia   | 0.1466 | 6.143  |
| 2 steps  | 0.1468 | 6.139  |
| 6 steps  | 0.1470 | 6.131  |
| 10 steps   | 0.1471 | 6.120  |
| 20 steps   | 0.1473 | 6.043  |
| 30 steps   | 0.1473 | 5.808  |
| 40 steps   | 0.1473 | 4.523  |
| 50 steps   | 0.1473 | 4.511  |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído para la respuesta escalón efecto del viento en la aceleración de la torre (Punto de operación a 13 m/s).



Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación 19 m/s)

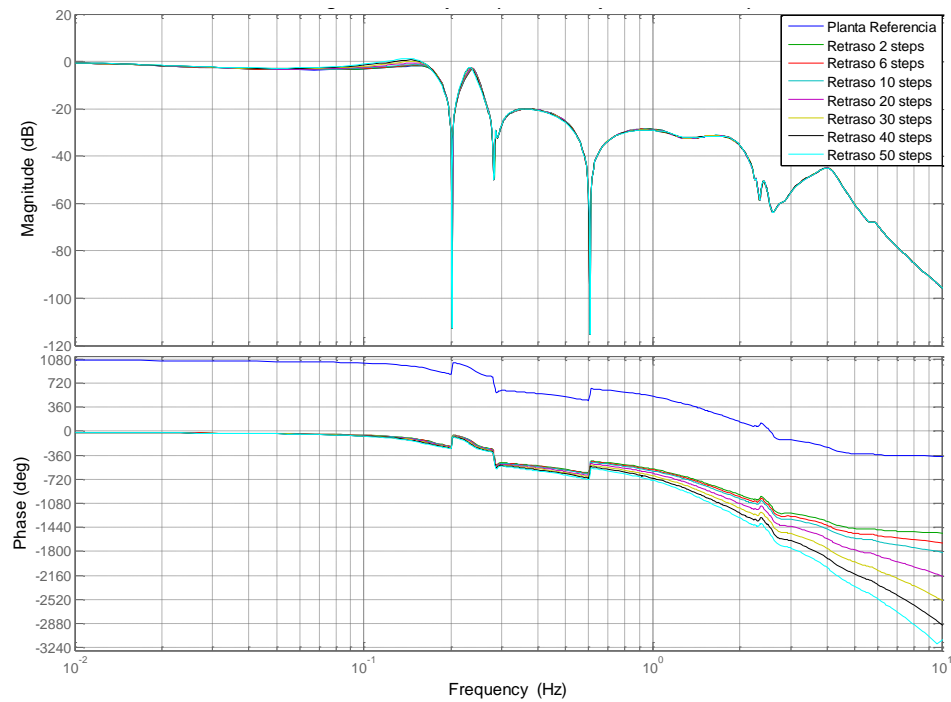


Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación 19 m/s)

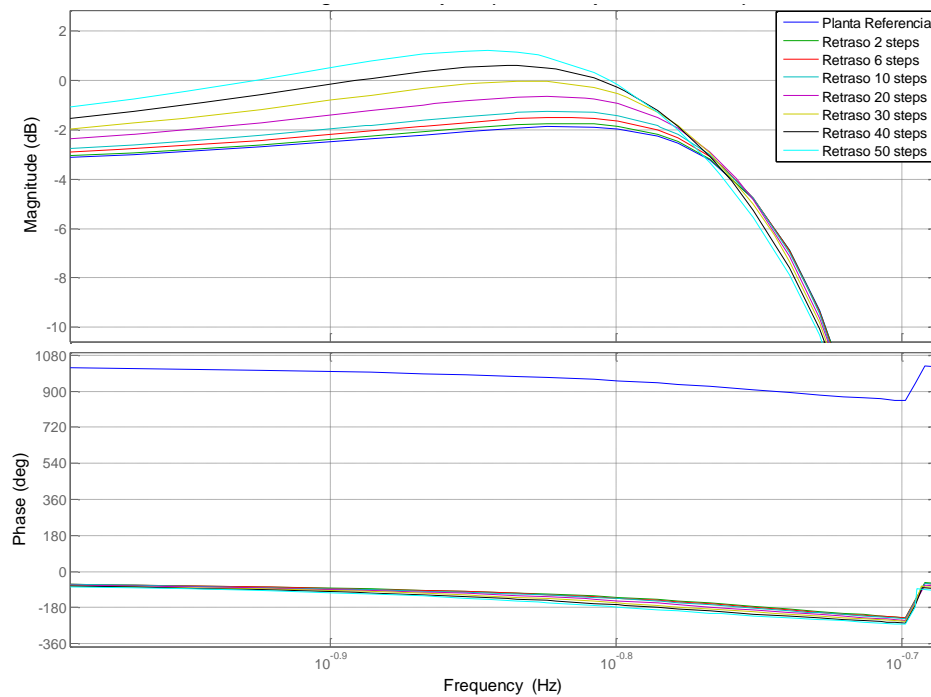
| Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch<br>(Punto de operación a 19 m/s) |      |        |
|---|------|--------|
| Retraso   | Mp   | Ts [s] |
| Referencia  | 1.15 | 18.98  |
| 2 steps   | 1.16 | 18.97  |
| 6 steps   | 1.17 | 18.93  |
| 10 steps  | 1.18 | 18.82  |
| 20 steps  | 1.21 | 22.88  |
| 30 steps  | 1.23 | 23.30  |
| 40 steps  | 1.27 | 23.71  |
| 50 steps  | 1.30 | 24.13  |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído para la respuesta escalón efecto del viento en el pitch (Punto de operación a 13 m/s).

## Punto de operación a 25 m/s



## Sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)



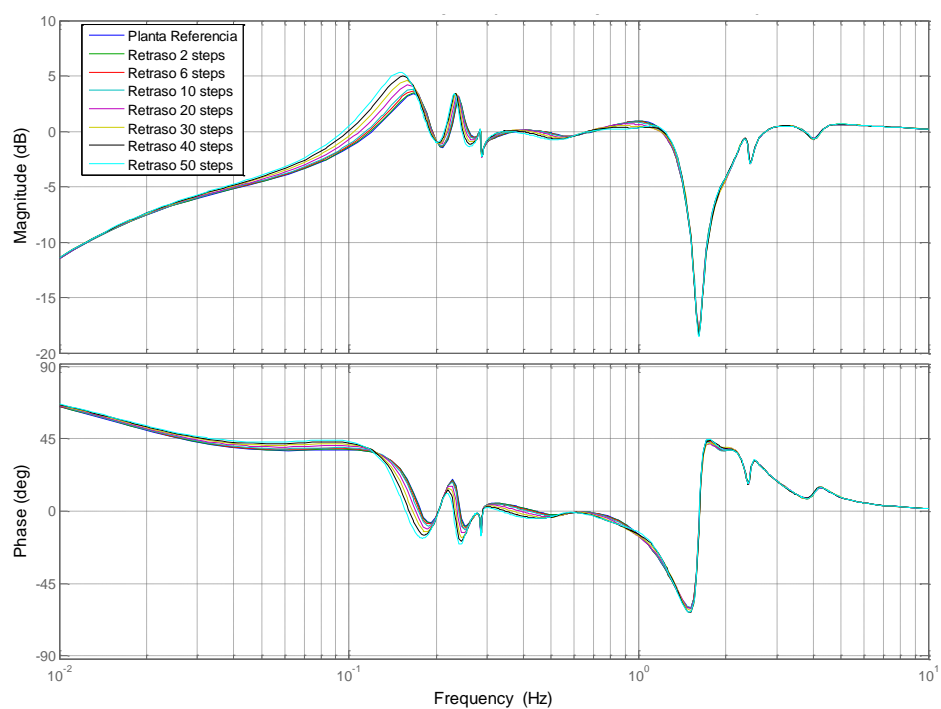
## Zoom sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)

Tabla 30 de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)

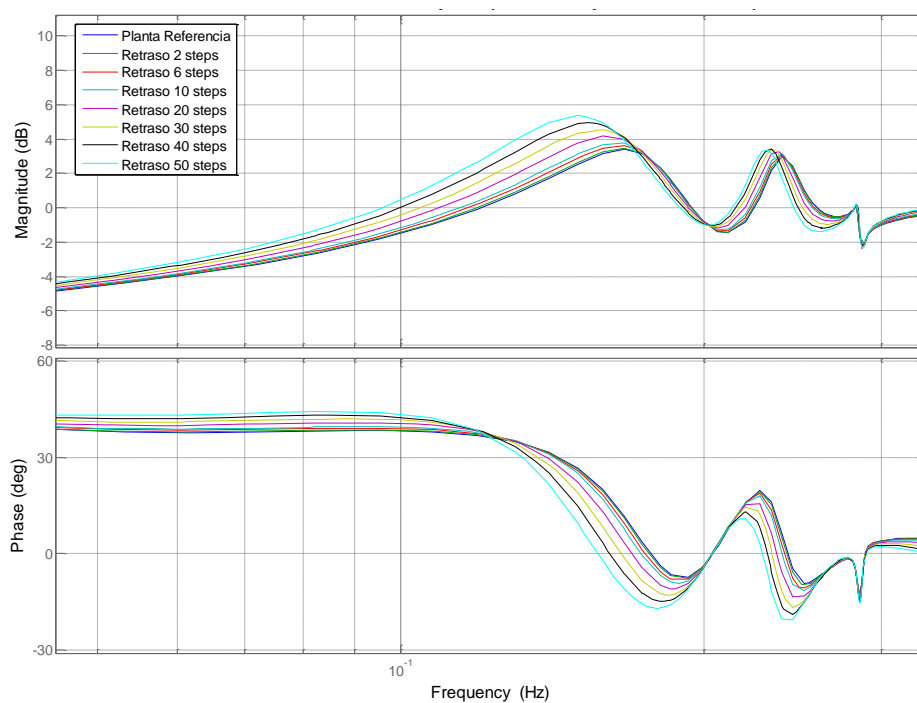
| Sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol<br>(Punto de operación a 25 m/s) |         |           |
|---|---------|-----------|
| Retraso   | WB [Hz] | Pico [dB] |
| Referencia  | 0.1695  | - 1.88    |
| 2 steps   | 0.1698  | -1.77     |
| 6 steps   | 0.1704  | - 1.50    |
| 10 steps  | 0.1709  | - 1.27    |
| 20 steps  | 0.1712  | - 0.65    |
| 30 steps  | 0.1711  | - 0.03    |
| 40 steps  | 0.1707  | 0.60      |
| 50 steps  | 0.1699  | 1.21      |

En este caso, el ancho de banda aumenta hasta alcanzar un retraso de 20 steps y luego comienza a disminuir al introducir más retrasos.

Además, en este punto de operación el pico se encuentra en la parte negativa menos para los casos de 40 y 50 steps.



Sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)

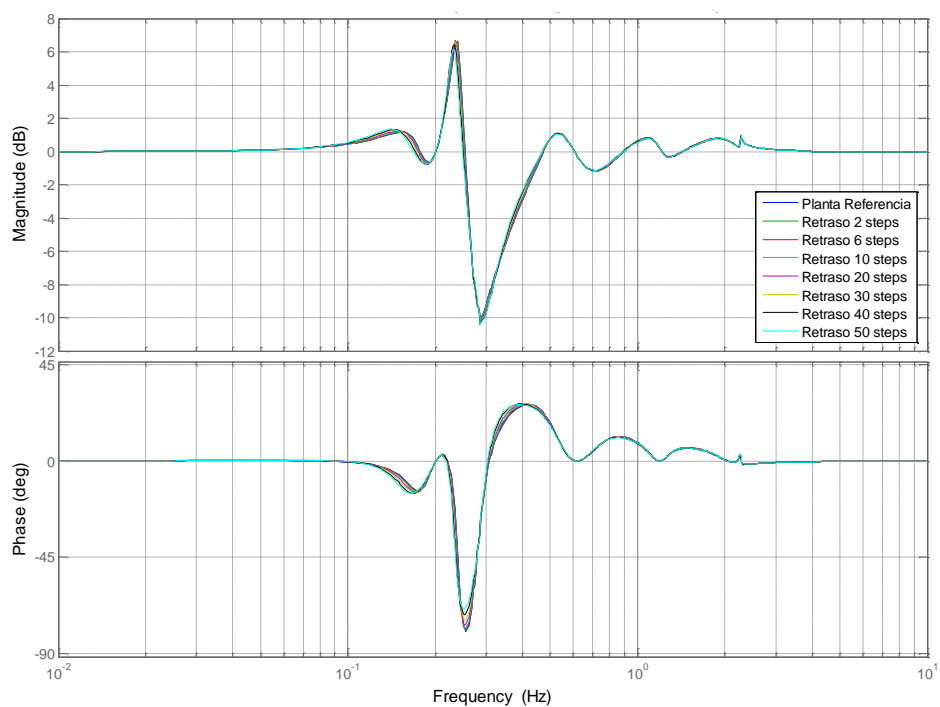


Zoom sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)

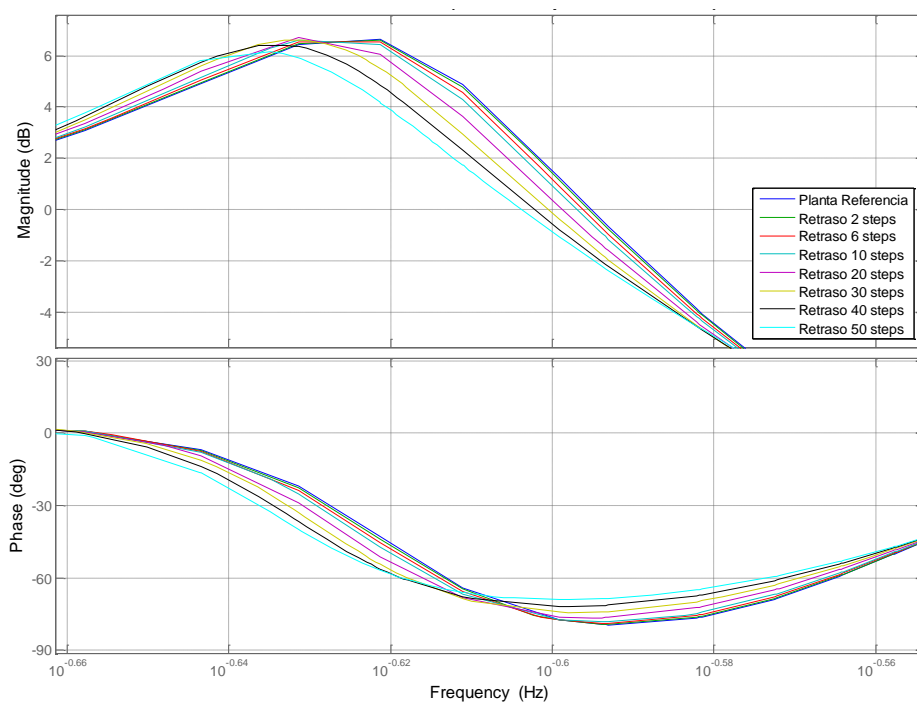


| Sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol<br>(Punto de operación a 25 m/s) |         |           |
|---|---------|-----------|
| Retraso   | WB [Hz] | Pico [dB] |
| Referencia  | 0.07644 | 3.40      |
| 2 steps   | 0.07569 | 3.49      |
| 6 steps   | 0.07438 | 3.63      |
| 10 steps  | 0.07325 | 3.76      |
| 20 steps  | 0.07027 | 4.17      |
| 30 steps  | 0.06731 | 4.56      |
| 40 steps  | 0.06474 | 4.96      |
| 50 steps  | 0.06233 | 5.35      |

Las reflexiones de estos resultados coinciden con las que se han extraído para sensibilidad rechazo a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 13 m/s).



Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 25 m/s)

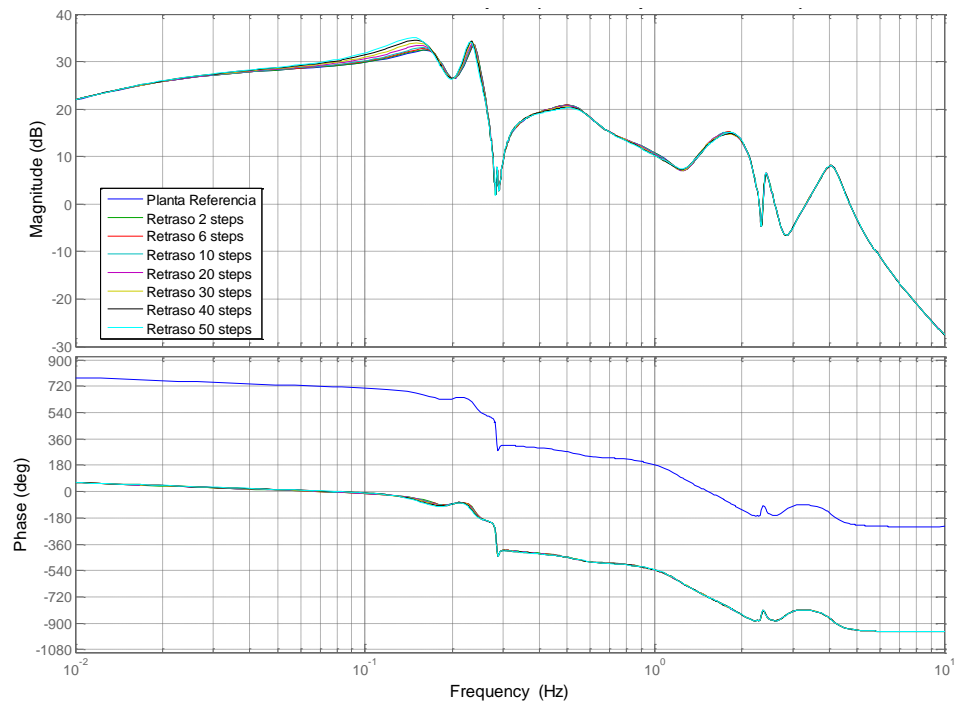


Zoom sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD (Punto de operación a 25 m/s)

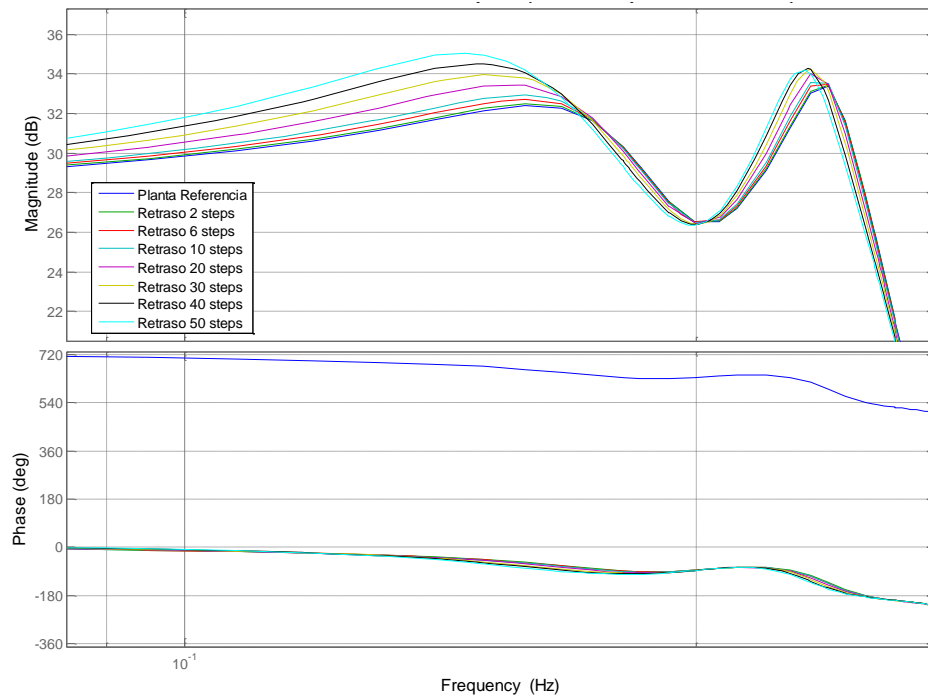
| Sensibilidad rechazo a perturbaciones del ATD<br>(Punto de operación a 25 m/s) |         |           |
|--|---------|-----------|
| Retraso  | WB [Hz] | Pico [dB] |
| Referencia   | 0.260   | 5.90      |
| 2 steps  | 0.260   | 5.82      |
| 6 steps  | 0.260   | 6.79      |
| 10 steps   | 0.259   | 6.70      |
| 20 steps   | 0.259   | 6.68      |
| 30 steps   | 0.256   | 6.62      |
| 40 steps   | 0.257   | 6.41      |
| 50 steps   | 0.257   | 6.20      |

En este caso, el ancho de banda aumenta hasta alcanzar un retraso de 30 steps y luego comienza a aumentar para los casos de 40 y 50 steps.

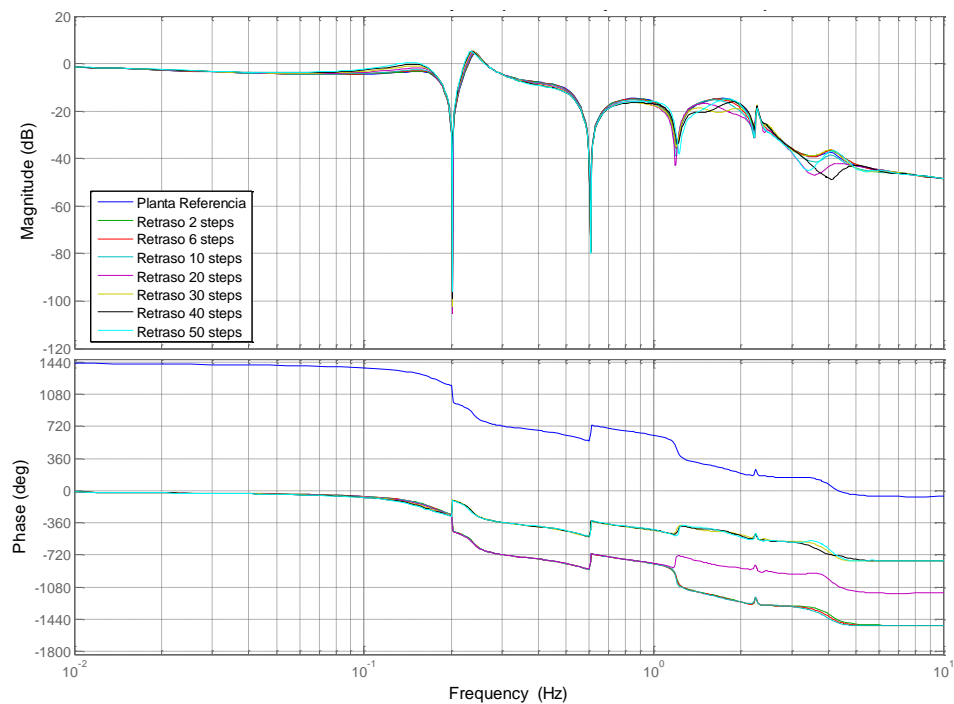
Además, en este punto de operación el pico se encuentra en la parte negativa menos para los casos de 40 y 50 steps.



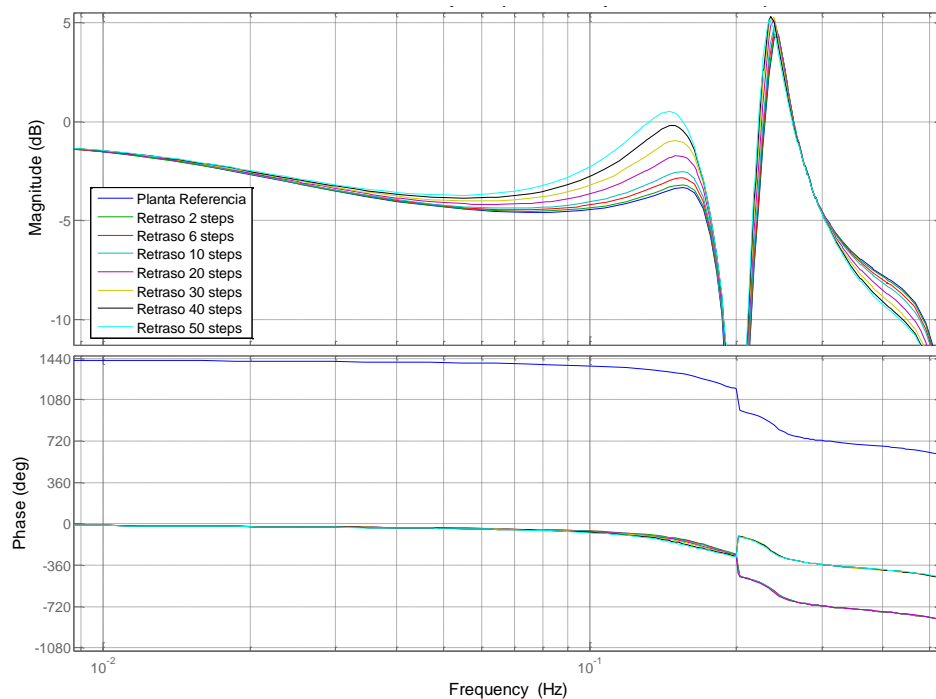
Efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 25 m/s)



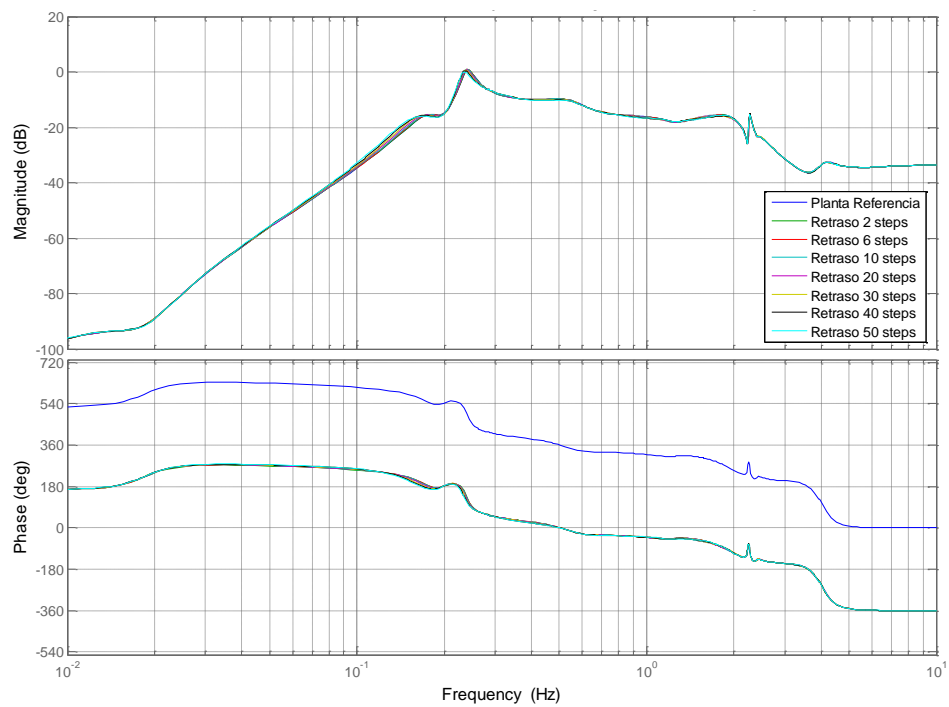
Zoom efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 25 m/s)



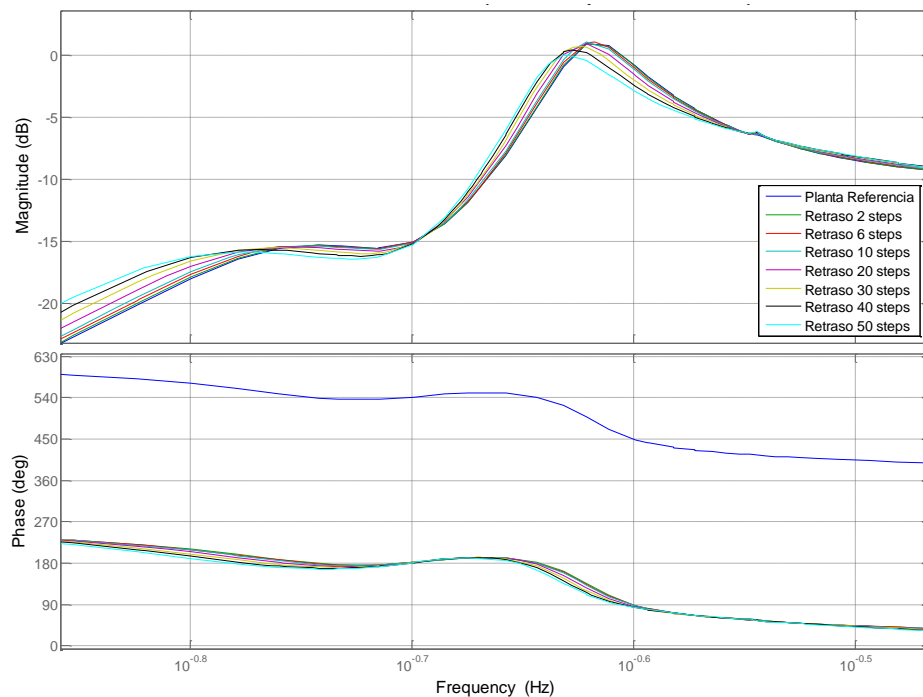
Efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 25 m/s)



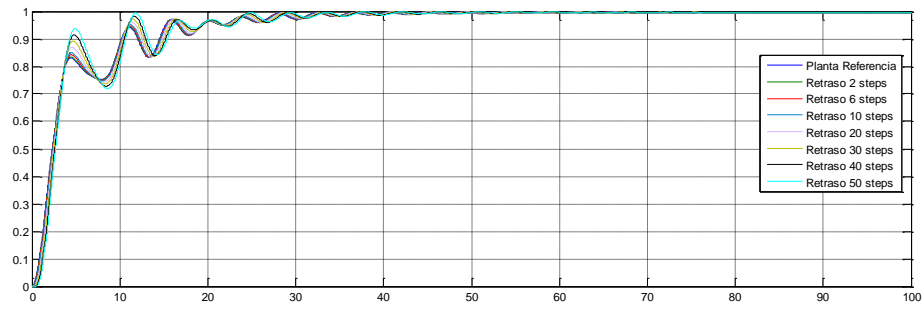
Zoom efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 25 m/s)



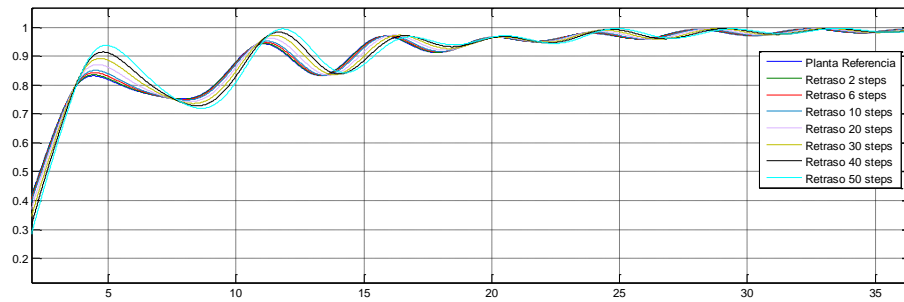
Efecto del viento en la aceleración de la torre (Punto de operación a 25 m/s)



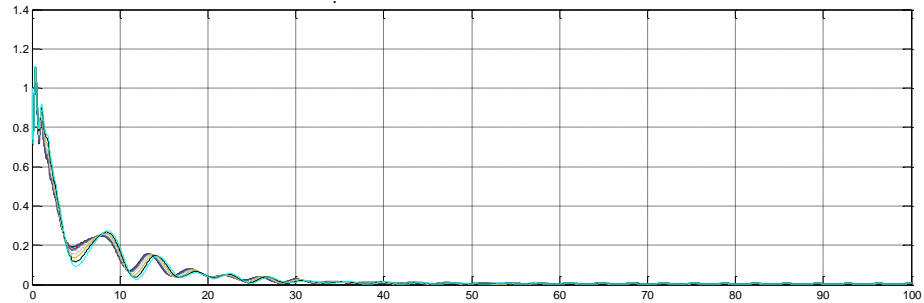
Zoom efecto del viento en la aceleración de la torre (Punto de operación a 25 m/s)



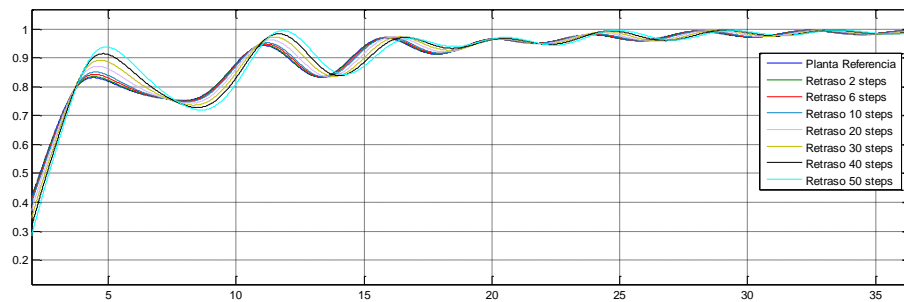
Respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)



Zoom respuesta escalón sensibilidad de seguimiento de referencia del scontrol (Punto de operación a 25m/s)



Respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)



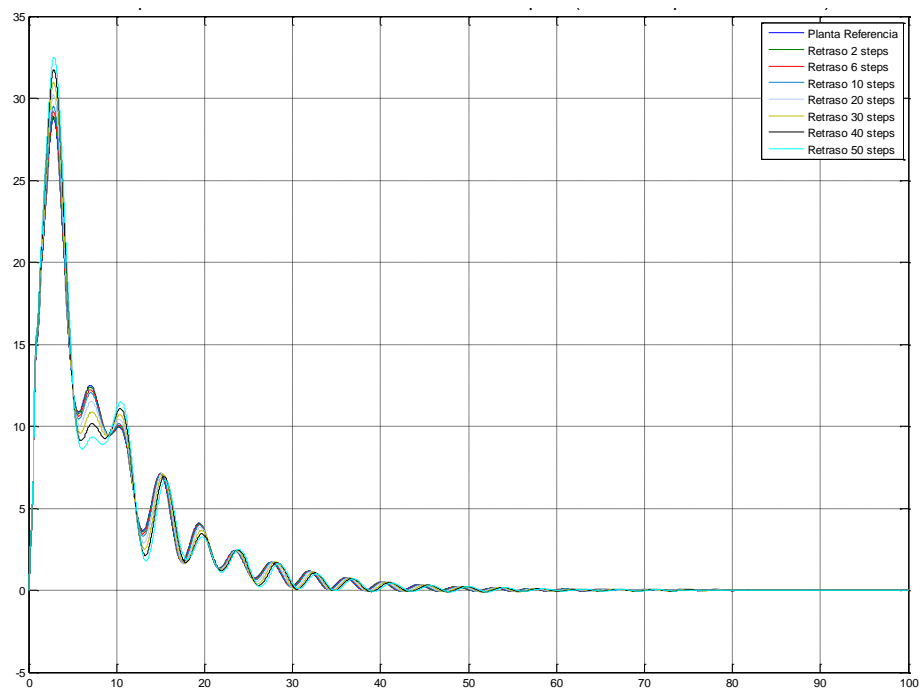
Zoom respuesta escalón sensibilidad a perturbaciones del scontrol (Punto de operación a 25 m/s)

| Respuesta escalón sensibilidades del scontrol<br>(Punto de operación a 25 m/s) |                              |        |       |                          |        |
|--|------------------------------|--------|-------|--------------------------|--------|
|  | DE SEGUIMIENTO DE REFERENCIA |        |       | RECHAZO A PERTURBACIONES |        |
| Retraso  | Mp                           | Ts [s] | t [s] | Mp                       | Ts [s] |
| Referencia   | 0                            | 14.77  | 2.40  | 1.09                     | 14.75  |
| 2 steps  | 0                            | 14.82  | 2.40  | 1.09                     | 14.81  |
| 6 steps  | 0                            | 14.93  | 2.35  | 1.10                     | 14.92  |
| 10 steps   | 0                            | 15.04  | 2.36  | 1.10                     | 15.04  |
| 20 steps   | 0                            | 15.36  | 2.34  | 1.10                     | 15.38  |
| 30 steps   | 0                            | 15.74  | 2.28  | 1.11                     | 15.78  |
| 40 steps   | 0                            | 23.08  | 2.22  | 1.11                     | 22.98  |
| 50 steps   | 0                            | 23.77  | 2.18  | 1.11                     | 23.66  |

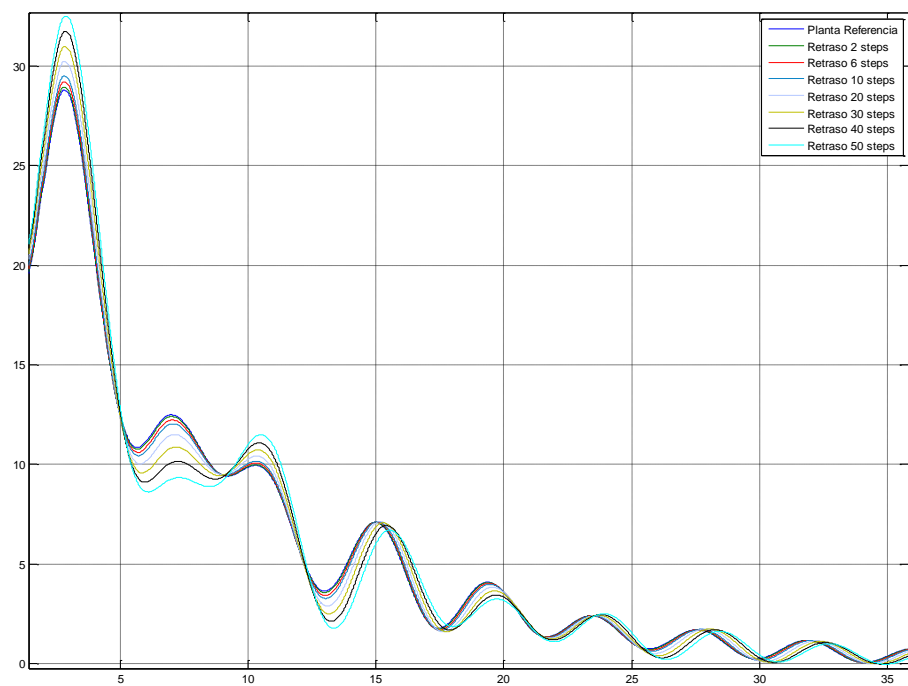
Se puede apreciar que para el caso de seguimiento de referencia no se tiene sobreimpulso para ninguno de los casos.

Para ambas sensibilidades, al igual que para los otros dos puntos de operación, el tiempo de estabilización aumenta conforme se añaden más retrasos.





Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 25 m/s)



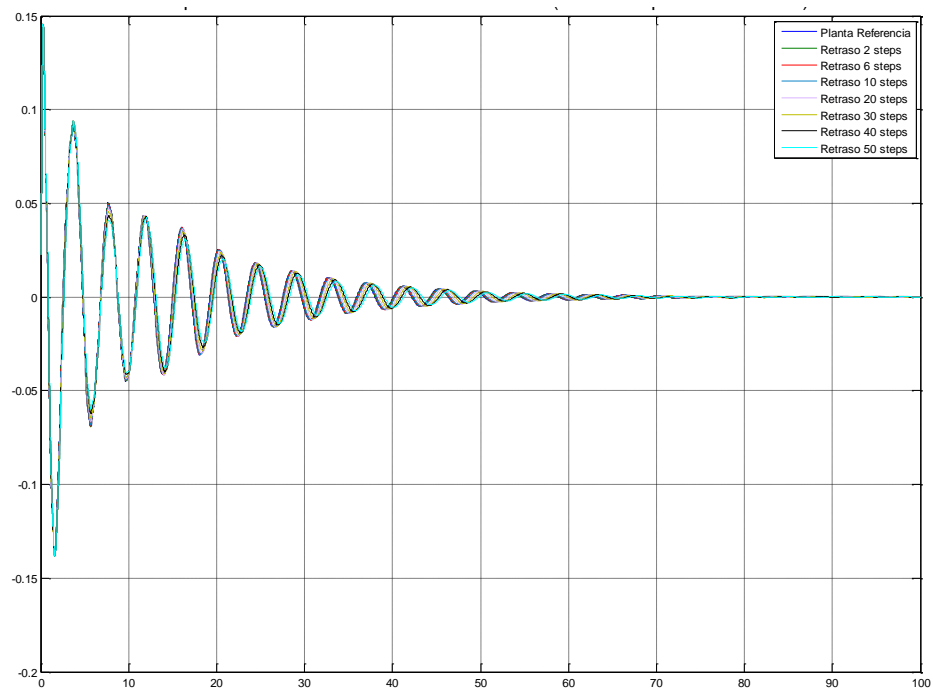
Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador (Punto de operación a 25 m/s)

**Respuesta escalón efecto del viento sobre la velocidad del generador  
 (Punto de operación a 25 m/s)**

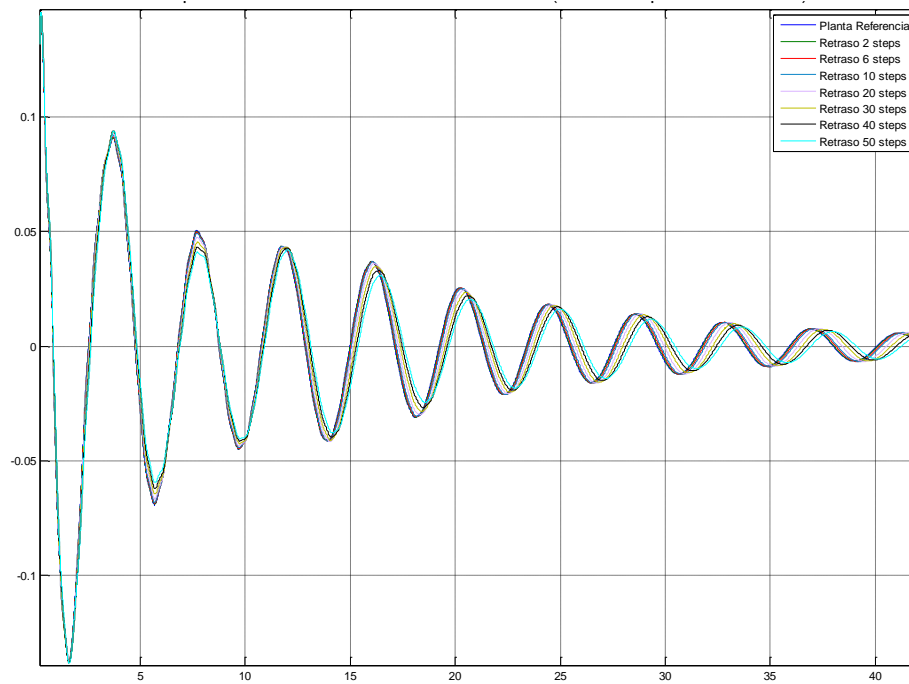
| <b>Retraso</b> | <b>Mp</b> | <b>Ts [s]</b> |
|----------------|-----------|---------------|
| Referencia     | 28.80     | 65.37         |
| 2 steps        | 28.94     | 65.39         |
| 6 steps        | 29.22     | 65.43         |
| 10 steps       | 29.50     | 62.04         |
| 20 steps       | 30.23     | 62.34         |
| 30 steps       | 30.98     | 71.08         |
| 40 steps       | 31.74     | 71.46         |
| 50 steps       | 32.50     | 67.90         |

En este punto de operación, el sobreimpulso aumenta al añadir más retrasos, al igual que en los otros dos puntos de operación.

En este caso, se aprecia que para los casos de 10 steps y 20 steps de retraso, el tiempo de estabilización es menor que el que necesita el sistema de referencia. Además, para los casos de 30 y 40 steps vuelve a aumentar por encima de la referencia pero para el caso de 50 steps vuelve a disminuir aproximándose bastante a la referencia.



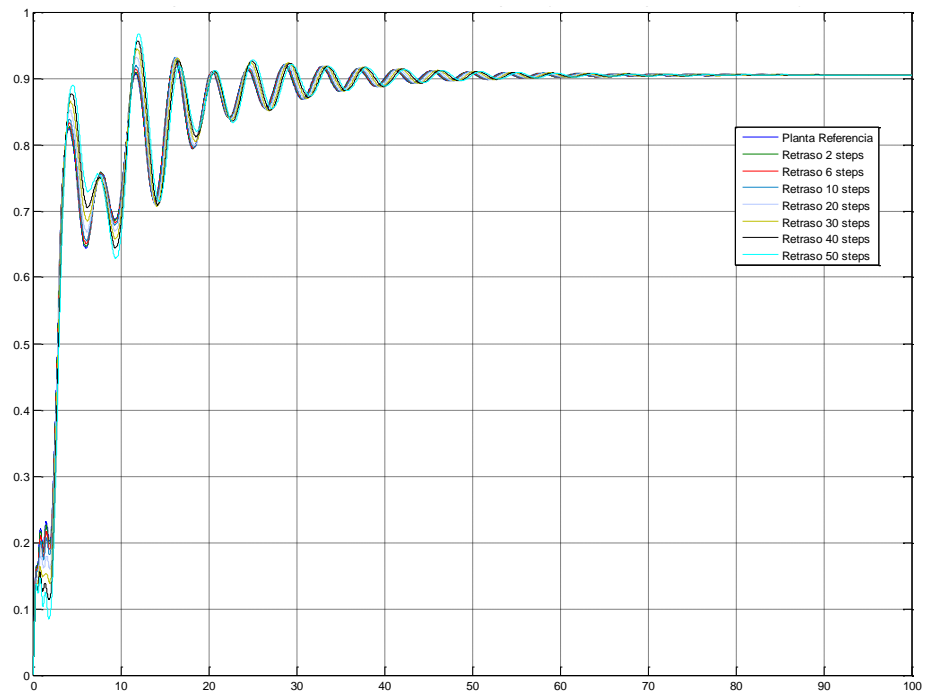
Respuesta escalón efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación a 25 m/s)



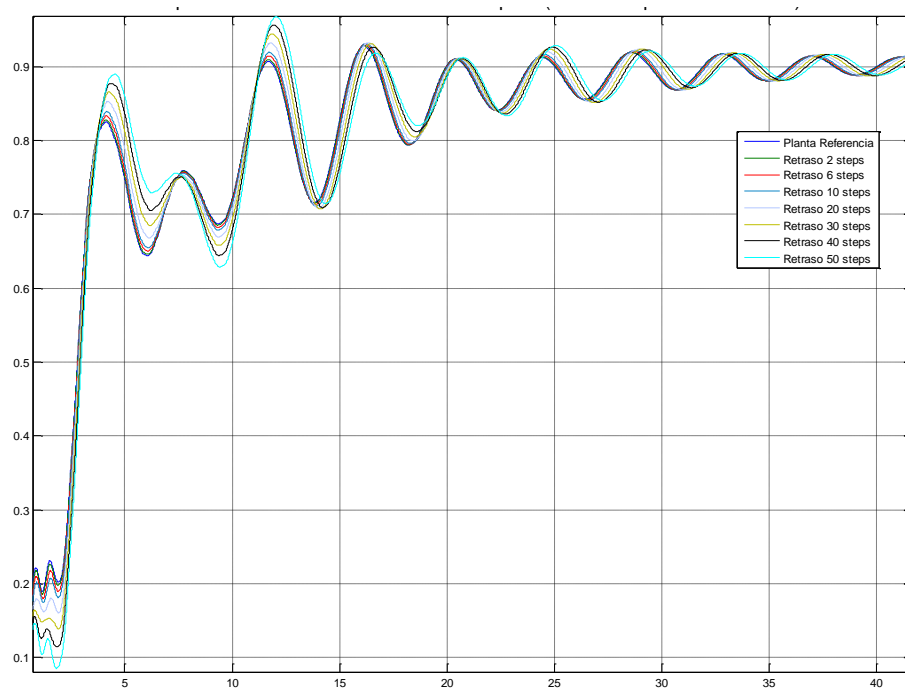
Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre la aceleración de la torre (Punto de operación a 25 m/s)

| Respuesta escalón efecto del viento sobre la aceleración de la torre<br>(Punto de operación a 25 m/s) |        |        |
|---|--------|--------|
| Retraso   | Mp     | Ts [s] |
| Referencia  | 0.1451 | 7.773  |
| 2 steps   | 0.1453 | 7.759  |
| 6 steps   | 0.1455 | 6.205  |
| 10 steps  | 0.1456 | 6.120  |
| 20 steps  | 0.1457 | 6.211  |
| 30 steps  | 0.1457 | 6.206  |
| 40 steps  | 0.1457 | 6.191  |
| 50 steps  | 0.1457 | 6.164  |

En este caso se observa que el sobreimpulso aumenta al añadir retrasos. Sin embargo, cabe destacar que el tiempo de estabilización disminuye al incluir retrasos en el sistema.



escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 25 m/s)



Zoom respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch (Punto de operación a 25 m/s)

**Respuesta escalón efecto del viento sobre el pitch  
 (Punto de operación a 25 m/s)**

| <b>Retraso</b> | <b>Mp</b> | <b>Ts [s]</b> |
|----------------|-----------|---------------|
| Referencia     | 0.91      | 22.93         |
| 2 steps        | 0.91      | 22.95         |
| 6 steps        | 0.91      | 26.64         |
| 10 steps       | 0.92      | 26.77         |
| 20 steps       | 0.93      | 27.02         |
| 30 steps       | 0.94      | 27.21         |
| 40 steps       | 0.96      | 27.36         |
| 50 steps       | 0.97      | 27.42         |